

AVALIAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FENÓMENOS DE HUMIDIFICAÇÃO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA 2D

MIGUEL TOMÁS PEREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Vitor Abrantes

Coorientador: Professora Doutora Eva Barreira

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Almeida

JUNHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miiec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha mãe

“Almost everybody is born a genius and buried an idiot”

Charles Bukowski

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira, Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida e Professor Doutor Vitor Carlos Trindade Abrantes Almeida, um grande obrigado por toda a dedicação, apoio e motivação contagiante que fez com que esta dissertação se realizasse.

À Sofia e Rita, por terem feito destes cinco anos de faculdade os mais memoráveis e pelo incansável apoio nas alturas que mais precisei. Obrigado por me empurrarem.

Aos meus pais e irmão, por terem feito de mim a pessoa que sou hoje, pelo amor incondicional e carinho, sem o qual não conseguiria chegar tão longe.

Ao Pedro, por me fazer sentir a pessoa mais sortuda do mundo todos os dias e por acreditar em mim quando não o consigo fazer.

A todos um grande obrigado.

RESUMO

A prevenção de patologias em edifícios, relacionadas com humidade e temperatura, é uma necessidade cada vez maior. Problemas de estanquidade à água e ar, insuficiente isolamento térmico, e condensações superficiais e internas, etc. conseguem ser evitados, garantindo a durabilidade e sustentabilidade das soluções construtivas adotadas. Para isto, deve ser realizado o dimensionamento higrotérmico, existindo vários programas de simulação higrotérmica para tal.

A presente dissertação tem como objetivo principal a avaliação da transferência de calor em fenómenos de humificação através de simulação higrotérmica 2D. Para tal, foi realizada a análise de sensibilidade do programa de simulação higrotérmica WUFI 2D e a análise de um ensaio de humificação, reproduzindo-o no WUFI 2D e comparando os seus resultados com os resultados de termografia de infravermelhos desse mesmo ensaio.

A análise de sensibilidade do programa teve como objetivo a identificação dos parâmetros de input mais condicionantes na simulação higrotérmica, com especial atenção aos parâmetros que pudessem influenciar a temperatura em fenómenos de humificação. Consistiu, inicialmente, na definição de um elemento construtivo e condições de simulação iniciais, definindo assim o caso de estudo. Seguidamente foram realizadas várias simulações, correspondentes à alteração de diversos parâmetros de input. Para cada simulação, os resultados de temperatura e humidade relativa foram retirados de diversos pontos no elemento construtivo, e com estes foram calculadas diferenças relativas face ao caso de estudo, de maneira a quantificar as variações provocadas pelas alterações dos diferentes parâmetros.

O ensaio de humificação de um provete de betão leve foi simulado no WUFI 2D, procedendo depois a alterações necessárias nos *inputs* do programa, no sentido de aproximar os resultados do programa aos das imagens térmicas do ensaio. Para isto, foi inicialmente desenvolvida uma maneira de obter perfis de temperatura superficial a partir do WUFI 2D. De seguida, um primeiro conjunto de simulações foi realizado para selecionar a melhor forma de simulação de humificação. Foram ajustadas as condições da simulação correspondente à melhor forma de humificação, de forma a obter resultados semelhantes ao das imagens térmicas do ensaio. Por fim, foram depois comparados os perfis de temperatura superficial do WUFI 2D com as imagens térmicas, no sentido de analisar a viabilidade da avaliação da transferência de calor em fenómenos de humificação através da simulação higrotérmica 2D.

Concluiu-se da análise de sensibilidade que a alteração dos parâmetros influencia, principalmente, a camada onde é aplicada, e que a existência de uma fonte de humidade conduz a variações de temperatura significativas. A comparação dos resultados do WUFI 2D com os resultados da termografia de infravermelhos permitiu concluir que o programa tende a sobrestimar os fenómenos de transferência de calor (ascensão da água e efeito de evaporação à superfície).

PALAVRAS-CHAVE: Simulação higrotérmica, Análise de sensibilidade, WUFI 2D, Fenómenos de humificação, Termografia de infravermelhos

ABSTRACT

The prevention of pathologies in buildings related to humidity and temperature is a rising necessity. Problems of water and air tightness, insufficient thermal insulation, and surface and internal condensation, etc. can be avoided, guaranteeing the durability and sustainability of the adopted building solutions. In this regard, hygrothermal dimensioning should be performed, with the use of hygrothermal simulation programs.

The main objective of the present dissertation is the evaluation of heat transfer in humidification phenomena using 2D hygrothermal simulation. For this purpose, the sensitivity analysis of WUFI 2D was performed and the analysis of a humidification experiment was conducted, simulating the experiment in WUFI 2D and comparing its results with the infrared thermography results of that same experiment. The sensitivity analysis aimed in identifying the most conditioning input parameters in the hygrothermal simulation, also determining the parameters that could influence the temperature in humidification phenomena. It consisted, initially, in the definition of a building element and initial simulation conditions, thus establishing the case study. Afterwards, several simulations were performed, corresponding to the change of several input parameters. For each simulation, the results of temperature and relative humidity were retrieved from several points in the building element, and with these, were calculated relative differences based the case study, to quantify the variations caused by the alterations of the different parameters.

The humidification experiment of a lightweight concrete specimen was simulated in WUFI 2D and the necessary changes were made in the program's inputs to bring the results of the program closer to that of the thermal images of the experiment. Firstly, a method for obtaining surface temperature profiles from WUFI 2D was conceived. Afterwards, a first set of simulations was performed to select the best form of simulating the humidification phenomena. The simulation corresponding to the best form of humidification simulation was adjusted, in order to obtain temperature profiles similar to the thermal images of the experiment. Finally, the WUFI 2D surface temperature profiles were compared with the thermal images, analysing the feasibility of the use of 2D hygrothermal simulation for heat transfer evaluation in humidification phenomena.

It was concluded from the sensitivity analysis that the alteration of the parameters influence, mainly, the layer where it's applied, and that the existence of a humidity source leads to significant temperature variations. The comparison of the results of WUFI 2D with the results of the infrared thermography showed that the program tends to overestimate the phenomena of heat transfer (water rise and evaporation on the surface).

KEYWORDS: Hygrothermal simulation, Sensitivity analysis, WUFI 2D, Humidification phenomena, Infrared thermography

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1.INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	1
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2. SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA	3
2.1. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE E DE CALOR	3
2.1.1. ARMAZENAMENTO DE HUMIDADE EM MATERIAIS E NO AR	3
2.1.2. TRANSPORTE DE HUMIDADE NOS MATERIAIS E NO AR	5
2.1.2.1. Difusão de vapor de água	5
2.1.2.2. Capilaridade e difusão superficial	5
2.1.2.3. Efeito combinado dos fenómenos de transporte de humidade.....	6
2.1.3. ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DE CALOR NOS MATERIAIS	7
2.1.3.1 Armazenamento de calor em materiais.....	7
2.1.3.2. Condução	7
2.1.3.3. Radiação	7
2.1.3.4. Convecção.....	9
2.2. MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE	10
2.3. WUFI 2D	12
2.3.1. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA.....	12
2.3.2. MODELO DE FUNCIONAMENTO	13
2.3.3. DADOS DE ENTRADA.....	14
2.3.4. DADOS DE SAÍDA	16
3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO WUFI 2D	19
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
3.2. METODOLOGIA	19
3.2.1. CASO DE ESTUDO	19
3.2.2. SIMULAÇÃO INICIAL-DEFINIÇÃO DA MALHA	22

3.2.3. DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES	24
3.3. RESULTADOS	26
3.3.1. VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE	26
3.3.2. VARIAÇÃO DA CONDUTÂNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL	29
3.3.3. VARIAÇÃO DA FRAÇÃO DE CHUVA INCIDENTE.....	31
3.3.4. VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SOLAR.....	34
3.3.5. VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE	36
3.3.6. ALTERAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DO ELEMENTO	38
3.3.7. ADIÇÃO DE UMA FONTE DE HUMIDADE.....	41
3.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO WUFI 2D COM OS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS	51
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	51
4.2. METODOLOGIA	51
4.2.1. CASO DE ESTUDO.....	51
4.2.2. CONSTRUÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL	52
4.2.3. SIMULAÇÕES NO WUFI 2D	53
4.2.3.1. Avaliação de diferentes formas de simulação de humidificação	53
4.2.3.2. Ajuste dos perfis de temperatura aos termogramas.....	57
4.3. RESULTADOS	59
5. CONCLUSÕES	63
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
ANEXOS.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 -Exemplo de diagrama psicométrico [4].....	4
Figura 2 -Curva higroscópica de materiais comuns de construção [5]	5
Figura 3-Mecanismo de transporte de humidade em poros de um paramento exterior	6
Figura 4 -Radiância espectral do corpo negro [18]	8
Figura 5- Comportamento da radiação incidente numa superfície	9
Figura 6- Perfil de humidade relativa(esquerda) e perfil de temperatura(direita) conseguidos por três modelos: EK-modelo melhorado, K-modelo de Kunzel, G-modelo de Grunewald (adaptado de [11])	12
Figura 7- Fluxograma adaptado do WufiWiki [7].....	13
Figura 8 - Perfil de temperatura no Wufi 2D Motion.....	17
Figura 9- Gráfico de temperatura no WUFIgraph.....	17
Figura 10 - Definição da geometria no WUFI 2D	20
Figura 11 - Superfícies do elemento construtivo.....	21
Figura 12- Pontos definidos para a extração dos resultados.....	22
Figura 13 - Malhas numéricas simuladas	23
Figura 14 - Diferenças relativas dos resultados de T (esquerda) e HR (direita) nas simulações	23
Figura 15 - Radiação incidente (esquerda) e chuva incidente (direita) para Lisboa (base de dados do WUFI)	25
Figura 16-Evoução da temperatura na simulação SDI	26
Figura 17 -Temperaturas dos pontos 2 e 21	26
Figura 18- Evolução da humidade relativa na simulação SDI	27
Figura 19- Evolução da humidade relativa na simulação SDII	27
Figura 20- Evolução da humidade relativa na simulação SDIII	27
Figura 21- Evolução da humidade relativa na simulação SDIV	27
Figura 22- Humidade relativa nos pontos 2 e 21	28
Figura 23- Evolução da temperatura para a simulação HEII	29
Figura 24- Evolução da humidade relativa para a simulação HEII	30
Figura 25 -Temperaturas dos pontos 4 e 23.....	30
Figura 26- Humidade relativa dos pontos 4 e 23	31
Figura 27- Humidades relativas observadas no Inverno: a) na simulação RI; b) na simulação RII	32
Figura 28-Humidades relativas observadas no Verão: a) na simulação RI; b) simulação RII.....	32
Figura 29 -Temperatura e humidade relativa do ponto 2.....	33
Figura 30- Temperaturas e humidades relativas dos pontos 19,21 e 23	33

Figura 31 - Evolução da temperatura das diferentes camadas nas simulações AI, AII, e AIII, nos dois dias mais quentes do verão.....	34
Figura 32 - Evolução da HR das diferentes camadas nas simulações AI, AII, e AIII, nos dois dias mais quentes do verão	35
Figura 33- Temperaturas dos pontos 1,2 e 4	35
Figura 34 Temperaturas dos pontos 19, 21 e 23	36
Figura 35- Temperaturas registadas no Verão na simulação EI (esquerda) e simulação EII (direita) .	37
Figura 36- Humidades relativas registadas no Verão na simulação EI (esquerda) e simulação EII (direita).....	37
Figura 37 -Temperaturas dos pontos 1, 2 e 4	37
Figura 38 - Temperaturas dos pontos 19, 21 e 23	38
Figura 39- Temperaturas nos pontos 20, 21 e 22	39
Figura 40 – Humidade relativa nos pontos 20, 21 e 22.....	40
Figura 41- Evolução da temperatura para dois dias de inverno na simulação MSI (esquerda) e MSII (direita).....	41
Figura 42- Evolução da humidade relativa na simulação MSII	41
Figura 43 -Temperaturas e humidades relativas dos pontos 2, 11 e 21	42
Figura 44-Temperaturas e suas diferenças relativas na primeira camada de reboco interior	43
Figura 45- Variação da condutância térmica do reboco interior com o teor de humidade	44
Figura 46 -Temperaturas e suas diferenças relativas na segunda camada de reboco interior	44
Figura 47- Humidades relativas e suas diferenças relativas na primeira camada de reboco interior...	45
Figura 48 - Humidades relativas e suas diferenças relativas na segunda camada de reboco interior .	46
Figura 49 - Temperaturas e suas diferenças relativas na primeira camada de reboco exterior	47
Figura 50 - Temperaturas e suas diferenças relativas na segunda camada de reboco exterior	47
Figura 51 - Humidades relativas e suas diferenças relativas na primeira camada de reboco exterior	48
Figura 52 - Humidades relativas e suas diferenças relativas na segunda camada de reboco exterior	49
Figura 53 -Termogramas do provete durante a humidificação para a) t=0.5h, b) t=4h, c) t=8h, d) t=24h	52
Figura 54- Perfis de temperaturas no provete de betão.....	53
Figura 55- Fronteiras e geometrias do provete na simulação I(esquerda) e II(direita)	54
Figura 56- Localização das temperaturas usadas na comparação de casos	54
Figura 57 -Temperaturas obtidas nas diferentes simulações no topo do provete	55
Figura 58-Temperaturas obtidas nas diferentes simulações no centro do provete	56
Figura 59- Temperaturas obtidas nas diferentes simulações na base do provete	56
Figura 60 - Temperaturas obtidas nas simulações A e B; e termogramas no topo do provete	58

Figura 61- Temperaturas obtidas nas simulações A e B; e termogramas no centro do provete	58
Figura 62-Temperaturas obtidas nas simulações A e B; e termogramas na base do provete	59
Figura 63 – Termograma (esquerda) e perfil de temperatura simulado (direita) do provete para t=0.5h	60
Figura 64 - Termograma (esquerda) e perfil de temperatura simulado (direita) do provete para t=4h	60
Figura 65 - Termograma (esquerda) e perfil de temperatura simulado (direita) do provete para t=8h	60
Figura 66 - Termograma (esquerda) e perfil de temperatura simulado (direita) do provete para t=24h	61
Figura 67- Zonas do provete onde a temperatura varia em mais de +/- 2%	61

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Propriedades dos materiais usados no caso de estudo retirados da base de dados do WUFI.....	20
Quadro 2- Extração de temperatura num ponto.....	22
Quadro 3- Resultados computacionais das simulações	23
Quadro 4-Médias e desvios padrão das diferenças relativas	24
Quadro 5- Simulações efetuadas	25
Quadro 6- Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em SDII, SDIII e SDIV	29
Quadro 7 -Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em HEII	31
Quadro 8 – Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em RII.....	34
Quadro 9 – Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em AI e AII	36
Quadro 10 - Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em EII.....	38
Quadro 11 - Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em OII, OIII, OIV	40
Quadro 12- Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em MSII.....	42
Quadro 13-Diferenças médias absolutas ente A e TERMO; e B e TERMO	59

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

C, c_s	[J/kgK]	Capacidade calorífica do material
d	[m]	Diâmetro do poro
D_t	[m ² /(s·K)]	Coeficiente de difusividade higrotérmica
D_w	[m ² /s]	Coeficiente de difusividade hídrica
D_φ	[kg/m·s]	Coeficiente de transporte de água líquida
g	[kg/(m ² ·s)]	Densidade do fluxo de difusão de vapor de água
g_w	[kg/m ² ·s]	Fluxo de água por capilaridade
H, H_s	[J/m ³]	Entalpia
h_c	[W/m ² ·K]	Coeficiente de transferência de calor por convecção
h_e	[W/m·K]	Condutância térmica superficial
HR, φ	[%], [-]	Humidade Relativa
I	[W/m ²]	Radiação emitida pela superfície
I_{atm}	[W/m ²]	Radiação emitida pela atmosfera
I_e	[W/m ²]	Radiação emitida por um corpo real
I_s	[W/m ²]	Componente normal da radiação solar incidente
L_v	[J/kg]	Calor latente de evaporação de água
p_a	[Pa]	Pressão parcial de ar seco
p_s, p_{sat}	[Pa]	Pressão de saturação
p_t	[Pa]	Pressão total de ar húmido
p_w	[Pa]	Pressão parcial de vapor de água
q	[W/m ²]	Densidade de fluxo de calor
q_c	[W/m ²]	Densidade de fluxo de calor por convecção
R_w	[J/(kg·k)]	Constante individual do gás
S_d	[m]	Espessura da camada de ar de difusão equivalente
T, ϑ	[K], [°C]	Temperatura
T_{ar}	[K]	Temperatura do ar próximo do solo
w	[kg/m ³]	Concentração de vapor de água
W, ρ_v	[kg/kg], [Kg/m ³]	Teor de humidade
W_{cr}	[kg/kg]	Teor de humidade crítico
W_h	[kg/kg]	Teor de humidade higroscópico
W_{max}	[kg/kg]	Teor de humidade máximo

W_{sat}	[kg/kg]	Teor de humidade de saturação
α	[-]	Coeficiente de absorção
δ_p	[s]	Permeabilidade ao vapor de água
ε	[-]	Emissividade
ε_{atm}	[-]	Emissividade atmosférica
η_w	[N·s/m ²]	Viscosidade da água
θ_{fl}	[K]	Temperatura do fluido-ar
θ_s	[K]	Temperatura superficial
λ	[W/m·°C]	Coeficiente de condutibilidade térmica
π	[Kg/(m·s·Pa)]	Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água
ρ	[-]	Coeficiente de reflexão
ρ_s	[Kg/m ³]	Densidade do material
ρ_w	[kg/m ³]	Densidade da água
π	[Kg/(m·s·Pa)]	Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água
σ	[W/m ² K ⁴]	Constante de Stefan-Boltzman
τ	[-]	Coeficiente de transmissão

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

Uma das principais causas de patologias em edifícios é a humidade em elementos construtivos que os compõem. Esta presença de humidade está intimamente relacionada com o comportamento higrotérmico - comportamento da humidade e temperatura - que um dado elemento apresenta devido às suas características e solicitações. O problema de humidade em elementos da envolvente do edifício está relacionado com problemas de estanquidade à água e ar, insuficiente isolamento térmico, e condensações superficiais e internas.

A importância em garantir, de antemão, a durabilidade, salubridade e sustentabilidade das soluções construtivas, evitando os problemas anteriormente referidos, leva a uma preocupação crescente com o dimensionamento higrotérmico da envolvente dos edifícios- estudos higrotérmicos e definição da composição adequada. Para isto, programas de simulação higrotérmica desempenham um papel importante, permitindo o dimensionamento e conceção de diferentes soluções construtivas através da avaliação do seu comportamento higrotérmico, em profundidade, face às condições exteriores e interiores previstas. No entanto, a obtenção de resultados fiáveis pressupõe um conhecimento aprofundado dos modelos de simulação.

Em fase de utilização de um edifício, a termografia de infravermelhos é uma técnica não invasiva, de abordagem superficial e rápida que permite a avaliação e quantificação das temperaturas de uma dada superfície. Resulta em imagens de fácil interpretação, que permitem identificar fenómenos de fugas de ar, acumulação de humidade, humidade ascensional e pontes térmicas, etc.

A aferição, a partir das imagens térmicas, dos resultados da transferência de calor em fenómenos de humidificação com simulação higrotérmica 2D permite potenciar a utilização destas ferramentas numéricas em estudos de diagnóstico.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal da presente dissertação é a avaliação da transferência de calor em fenómenos de humidificação através de simulação higrotérmica 2D. Para isto foram definidos objetivos parciais:

- Recolha bibliográfica com finalidade de compreender os fenómenos de transferência de calor e de humidade e ter conhecimento dos modelos de transferência de calor e humidade existentes;
- Seleção do programa adequado à simulação destes fenómenos;
- Identificação dos parâmetros de input que podem influenciar a temperatura em fenómenos de humidificação;

- Análise de sensibilidade do programa de simulação higrotérmica a ser utilizado - o WUFI 2D- quantificação das variações provocadas no comportamento de um elemento construtivo face à alteração de diversos parâmetros, identificação dos parâmetros com mais interferência no cálculo higrotérmico e o reconhecimento de debilidades e potencialidades do programa;
- Análise de um ensaio de humificação e a reprodução do mesmo no programa WUFI 2D, comparando os seus resultados com os resultados da termografia de infravermelhos, no sentido de avaliar a viabilidade da avaliação da transferência de calor em fenómenos de humificação através da simulação higrotérmica 2D.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é composta por cinco capítulos, que estão divididos da seguinte maneira:

- Capítulo 1- Trata-se da introdução e define o enquadramento do trabalho, objetivos e a organização do mesmo;
- Capítulo 2- Corresponde ao estado da arte. Descreve os fenómenos subjacentes à simulação higrotérmica, isto é, os mecanismos de transporte e armazenamento de calor e de humidade. São também apresentados diferentes modelos de transferência de calor e humidade, assim como limitações, contributos e propostas de alteração aos mesmos. São enumerados vários programas de simulação higrotérmica, dando especial atenção aos diferentes programas da gama WUFI. Destes, destaca-se o WUFI 2D, alvo de estudo desta dissertação, sendo pormenorizado o seu modelo de funcionamento, dados de entrada (input) e dados de saída (output);
- Capítulo 3- Neste capítulo é efetuada a análise do programa WUFI 2D. Para isto, é definido um elemento construtivo e pontos no mesmo, alvos de extração de resultados. Ao elemento construtivo são realizados conjuntos de simulações, correspondentes à alteração de parâmetros: malha de elementos, espessura de camada de ar de difusão equivalente, condutância térmica superficial, fração de chuva incidente, coeficiente de absorção solar, emissividade, orientação e fonte de humidade. Para cada simulação, são apresentados e avaliados os resultados de humidade relativa e temperatura nos pontos previamente definidos, destacando os resultados mais peculiares ou representativos do fenómeno a evidenciar. Por fim, a discussão de resultados consiste em, de forma mais simplificada (sem recurso aos pontos), a avaliação e análise comparativa dos resultados obtidos, em faces interiores e exteriores do elemento construtivo;
- Capítulo 4- A comparação dos resultados do WUFI 2D com os resultados de termografia de infravermelhos é realizado. No início do capítulo, é introduzido e sucintamente explicado o conceito de termografia. Seguidamente, é apresentado o caso de estudo - o ensaio da humificação de um provete de betão leve pela base, do qual se utilizará os dados relativos ao provete e condições de ensaio no WUFI 2D. São também apresentados termogramas do mesmo provete. Antes da realização de simulações, é descrito o método de construção de perfis superficiais de temperatura a partir de resultados do WUFI 2D. É apresentado um conjunto de simulações iniciais, para que seja definido a melhor forma de simulação de humificação no WUFI 2D – é selecionada a melhor forma após uma análise comparativa de resultados. Posteriormente, são realizadas alterações à simulação selecionada de modo a ajustar os perfis superficiais resultantes aos termogramas fornecidos;
- Capítulo 5- São apresentadas as conclusões desta dissertação e eventuais desenvolvimentos futuros.

2

SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA

2.1. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE E DE CALOR

2.1.1. ARMAZENAMENTO DE HUMIDADE EM MATERIAIS E NO AR

O ar húmido é constituído por ar seco e uma percentagem de vapor de água. De acordo com Dalton [1], a pressão total de um gás é obtida através da soma das pressões parciais dos gases individuais, por isso, a pressão do ar húmido é dada pela seguinte equação [2]:

$$p_t = p_a + p_w \quad [1]$$

em que

p_t	[Pa]	Pressão total de ar húmido
p_a	[Pa]	Pressão parcial de ar seco
p_w	[Pa]	Pressão parcial de vapor de água

A pressão parcial de vapor de água é obtida pela aplicação da Lei dos Gases Ideais [3], que a correlaciona com o volume, temperatura e quantidade do vapor de água no ar:

$$p_w = R_w \cdot T \cdot w \quad [2]$$

onde

p_w	[Pa]	Pressão parcial de vapor de água
$R_w = 461.52$	[J/(kg·K)]	Constante individual do gás
T	[K]	Temperatura absoluta
w	[kg/m³]	Concentração de vapor de água

A concentração de vapor de água, num material higroscópico (capaz de armazenar humidade por adsorção) ou no ar, relaciona-se com a humidade relativa do mesmo.

No ar, a relação entre o teor de vapor de água, pressão de vapor de água, humidade relativa e temperatura é estabelecida a partir do diagrama psicrométrico (figura 1), que se baseia na lei dos gases ideais: no eixo horizontal inferior está representada a temperatura do ar em °C, no eixo horizontal superior, o teor de água em g/kg, e no eixo vertical, a pressão parcial de vapor de água em Pa. Para cada percentagem de

humidade relativa, é-lhe associada uma curva exponencial, estando representado apenas percentagens múltiplas de 10.

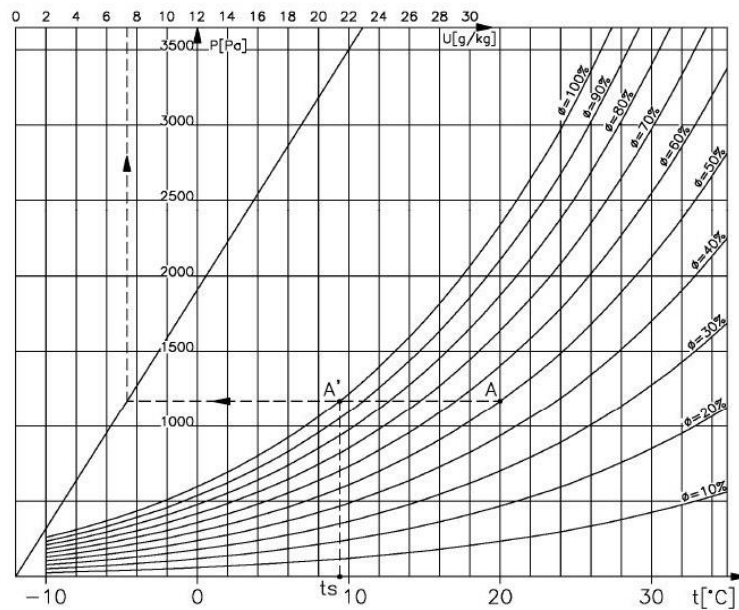


Figura 1 -Exemplo de diagrama psicrométrico [4]

A pressão de saturação do ar (pressão do ar quando este se encontra completamente saturado de água) para uma dada temperatura, obtém-se pela utilização da curva de humidade relativa 100%, sendo que a pressão de vapor de água será igual ao de saturação [4]:

$$HR = \frac{p_w}{p_{sat}} \quad [3]$$

em que

HR [-] Humidade Relativa

p_{sat} [Pa] Pressão de saturação- em função da temperatura ambiente

O teor de água de um material higroscópico em função da sua humidade relativa é representado na curva higroscópica/curva de adsorção do mesmo (figura 2). Para o mesmo valor de humidade relativa, a quantidade de água absorvida é tanto maior quanto mais higroscópico for o material. A figura 2 [5] é um exemplo de curvas higroscópicas de diferentes materiais de construção.

Para cada material higroscópico, existem teores de humidade que limitam o domínio em que se encontra: teor de humidade higroscópico (W_h), a partir do qual se está no domínio higroscópico do material, havendo adsorção de água; teor de humidade crítico (W_{cr}), atingindo a humidade relativa de 100% e que limita inferiormente o domínio capilar; teor de humidade de saturação (W_{sat}) que corresponde à “quantidade de água que um material contém quando em contacto com um plano de água durante um determinado período de tempo.” [4], que limita inferiormente a humificação sob pressão, e por fim, teor de humidade máximo (W_{max}), que limita superiormente a humificação sob pressão do material e corresponde ao “teor de humidade que um material apresenta quando todo o volume não ocupado pelo esqueleto sólido da estrutura porosa está preenchido com água” [4].

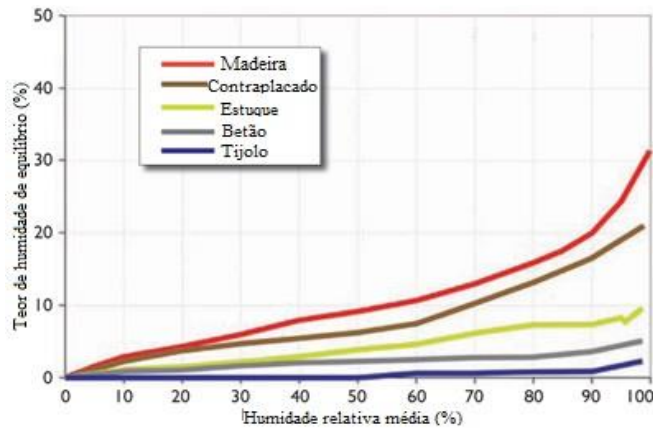


Figura 2 -Curva higroscópica de materiais comuns de construção [5]

2.1.2. TRANSPORTE DE HUMIDADE NOS MATERIAIS E NO AR

2.1.2.1. Difusão de vapor de água

A transferência de umidade por difusão de vapor através de um elemento construtivo, tanto através de uma camada de ar ou através de materiais porosos, é resultado direto de um gradiente de pressão de vapor de água no elemento - Difusão de Fick - bem como um gradiente de temperatura - Efeito de Soret. [6] Comparativamente ao efeito da diferença de pressões de vapor, o efeito de diferença de temperatura é irrelevante para a difusão de vapor de água. A densidade de fluxo de vapor que atravessa um material poroso é traduzida pela aplicação da lei de Fick, seguindo os pressupostos que o fluxo de gás, líquido e gradiente de temperatura são inexistentes [4]:

$$g = -\pi(T, HR) \cdot \frac{dP_w}{dx} \quad [4]$$

em que

g	[kg/(m ² ·s)]	Densidade do fluxo de difusão de vapor de água
$\pi(T, HR)$	[Kg/(m·s·Pa)]	Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, sob ação de um gradiente de vapor de água, em função da temperatura e da umidade relativa
$\frac{dP_w}{dx}$	[Pa/m]	Gradiente de pressão de vapor de água

Embora o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água seja uma característica bem estabelecida para cada material, este é influenciado pela umidade relativa ambiente: em materiais higroscópicos, a permeabilidade ao vapor aumenta substancialmente com o aumento da umidade relativa, no entanto, em materiais pouco higroscópicos, este coeficiente é pouco alterado pela variação da umidade relativa.

2.1.2.2. Capilaridade e difusão superficial

Os materiais contêm capilares, nos quais água líquida se movimenta, por exemplo, água da chuva incidente. Existe movimento de água por capilaridade quando o teor de umidade de um material ultrapassa o seu valor crítico (o material é incapaz de acumular mais água, passando do domínio higroscópico para o domínio capilar). O transporte de água por capilaridade é resultado de um gradiente de pressão de água e é dado por [2]:

$$g_w = -\rho_w \frac{d^2}{32\eta_w} \frac{dP_w}{dx} \quad [5]$$

em que

g_w	[kg/m ² s]	Fluxo de água por capilaridade
ρ_w	[kg/m ³]	Densidade da água
d	[m]	Diâmetro do poro
η_w	[N·s/m ²]	Viscosidade da água
P_w	[Pa]	Pressão de água

Quando a humidade relativa no material atinge valores suficientemente altos, o seu gradiente impulsiona a difusão superficial, em que o transporte de água ocorre na lâmina de água presente nas superfícies dos poros de materiais higroscópicos e em micro-capilares [6].

2.1.2.3. Efeito combinado dos fenômenos de transporte de humidade

Na figura 3, estão esquematizados os três mecanismos de transporte de humidade, onde se verificam três casos de um poro de um paramento exterior no inverno, em que a humidade relativa é superior no exterior do paramento e a pressão de vapor de água é inferior no exterior. Kunzel [6] estabelece o encadeamento dos fenômenos da seguinte maneira:

- Quando o paramento se encontra seco, ocorre difusão de vapor do interior para o exterior do mesmo, uma vez que o vapor vai para onde a pressão de vapor é inferior;
- Quando o paramento se encontra com humidade suficiente para mobilizar a lâmina de água na superfície dos poros, dá-se a difusão superficial do exterior para o interior: a água desloca-se para onde a espessura da lâmina de água for inferior, isto é, onde a humidade relativa for inferior;
- O teor de humidade no material aumenta, ocorrendo condução por capilaridade. *“Sob condições de humidade capilar no material, por exemplo, devido à chuva, os capilares começam a encher e tem início a condução capilar, o tipo mais eficiente de transporte de humidade. Aqui, a força motriz é a tensão capilar, que resulta da tensão superficial da água no menisco na interface entre a água e o ar dos poros.”* [7]

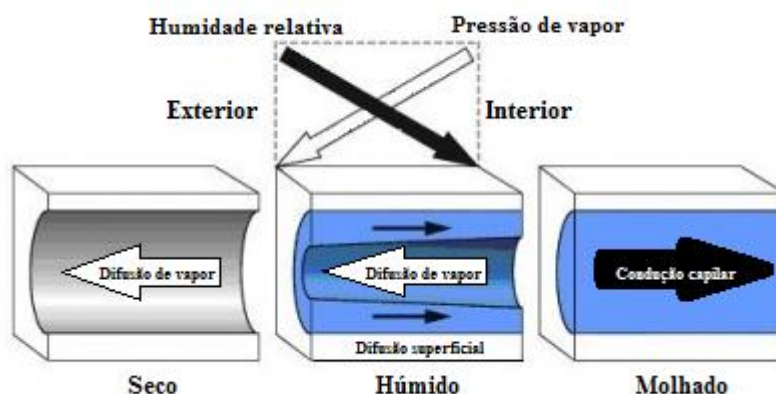


Figura 3-Mecanismo de transporte de humidade em poros de um paramento exterior

2.1.3. ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DE CALOR NOS MATERIAIS

2.1.3.1 Armazenamento de calor em materiais

A quantidade de calor acumulado por um material é designada por entalpia que, em elementos construtivos, varia linearmente com a temperatura, sendo esta relação expressa por [6]:

$$H_s = \rho_s \cdot c_s \cdot \vartheta \quad [6]$$

em que

H_s	[J/m ³]	Entalpia
ρ_s	[Kg/m ³]	Densidade do material
c_s	[J/kgK]	Capacidade calorífica do material
ϑ	[°C]	Temperatura

2.1.3.2. Condução

O transporte de calor por condução nos elementos construtivos, assim como na difusão de vapor de água, resulta diretamente de um gradiente, neste caso de temperatura, e é também influenciado pelas propriedades térmicas do elemento. Assim, o fluxo de calor, obedecendo à lei de Fourier é calculado com a seguinte equação [4]:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad [7]$$

em que

q	[W/m ²]	Densidade de fluxo de calor
λ	[W/m·°C]	Coeficiente de condutibilidade térmica do material
$\frac{dT}{dx}$	[°C/m]	Gradiente de temperatura

2.1.3.3. Radiação

Qualquer superfície que se encontre com uma temperatura superior a 0K irradia calor, através de ondas cujos comprimentos de onda variam entre $10^{-7}\mu\text{m}$ e $10^{-3}\mu\text{m}$, correspondendo a ondas ultravioleta, ondas de luz e ondas infravermelho [2]. A mesma superfície, para além de poder emitir calor, ainda o pode receber: emissão e absorção de calor.

A emissão de calor de uma superfície ideal, que absorve toda a radiação que nela incide, depende da sua temperatura absoluta, sendo traduzida pela lei de Stefan-Boltzman [2]:

$$I = \sigma \cdot T^4 \quad [8]$$

em que

I	[W/m ²]	Radiação emitida pela superfície
$\sigma=5.67 \cdot 10^{-8}$	[W/m ² K ⁴]	Constante de Stefan-Boltzman
T	[K]	Temperatura absoluta do corpo

A lei de Stefan-Boltzman resulta da integração da curva de Planck (figura 4), que representa a radiação emitida por um corpo negro/superfície ideal, em função do seu comprimento de onda e da sua temperatura. Assim, a lei de Stefan-Boltzman representa a energia emitida por um corpo negro, para todos os comprimentos de onda [8].

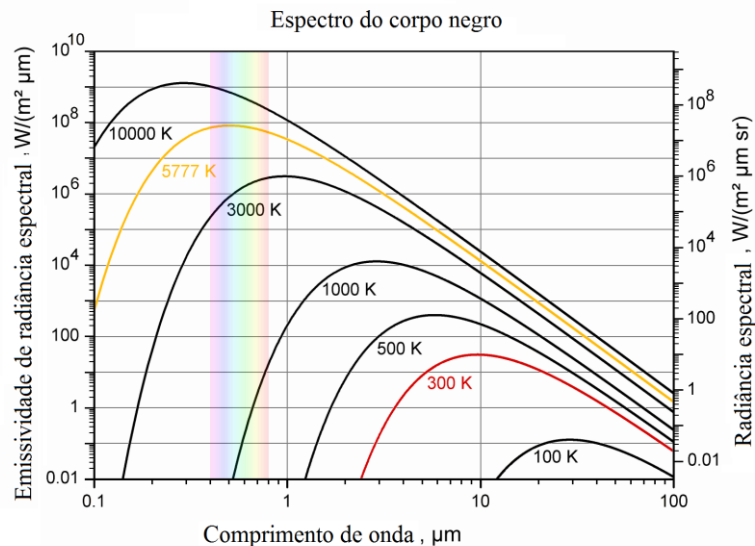


Figura 4 -Radiância espectral do corpo negro [17]

A radiação emitida por um corpo real (I_e), que é menor que num corpo negro, é influenciada pela emissividade (a capacidade de emitir energia por radiação), ε do material constituinte:

$$I_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [9]$$

No caso de edifícios, as trocas de radiação são efetuadas entre o sol, a atmosfera, a terra, e a fachada do edifício:

- O fluxo de calor numa superfície, neste caso na fachada, devido à radiação solar, também tratado por onda curta, é dado por [6]:

$$q = \alpha \cdot I_s \quad [10]$$

em que

q	[W/m²]	Fluxo de calor
α	[-]	Coefficiente de absorção de radiação solar
I_s	[W/m²]	Componente normal da radiação solar incidente

Uma superfície de cor escura terá um coeficiente de absorção α de 0,8 enquanto uma superfície clara terá um α de 0,2 [9], influenciando a quantidade de calor absorvida pela superfície;

- A radiação emitida pela atmosfera, obtida a partir a aplicação da lei de Stefan-Boltzman, é função da emissividade atmosférica, ε_{atm} e da sua temperatura próximo do solo, T_{ar} :

$$I_{atm} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{ar}^4 \quad [11]$$

- O calor radiado pela terra, tal como numa superfície real, é obtido pela aplicação da lei de Stefan-Boltzman.

O comportamento de um corpo, face à radiação, depende das suas propriedades, absorvendo, transmitindo e refletindo a radiação (figura 5). Tendo em conta a conservação de energia, a soma da radiação absorvida, refletida e transmitida será igual à radiação incidente [6]:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad [12]$$

$\alpha = q_{Ra}/q_{Ri}$	Coeficiente de absorção: quociente entre a radiação absorvida e radiação incidente
$\rho = q_{Rr}/q_{Ri}$	Coeficiente de reflexão: quociente entre a radiação refletida e radiação incidente
$\tau = q_{Rt}/q_{Ri}$	Coeficiente de transmissão: quociente entre a radiação transmitida e radiação incidente

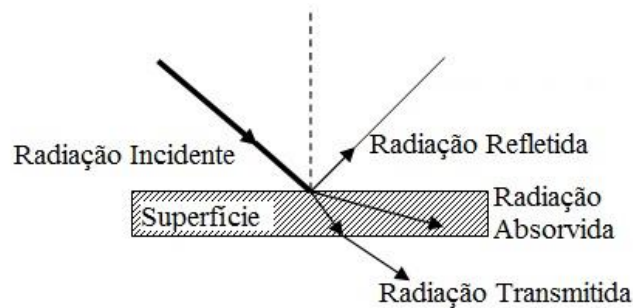


Figura 5- Comportamento da radiação incidente numa superfície

No caso de a superfície ser opaca, que é o caso das fachadas dos edifícios, não há transmissão de radiação ($\tau = 0$), ocorrendo apenas reflexão e absorção da radiação incidente.

2.1.3.4. Convecção

A superfície também recebe calor através de convecção: trata-se da transferência de calor através do movimento de um fluido(ar), ocorrendo entre a superfície e o ar adjacente a ela. O fluxo de calor por convecção é dado pela lei de Newton [2]:

$$q_c = h_c \cdot (\theta_{fl} - \theta_s) \quad [13]$$

em que

q_c	[W/m ²]	Densidade de fluxo de calor por convecção
h_c	[W/m ² ·K]	Coeficiente de transferência de calor por convecção
θ_{fl}	[K]	Temperatura do fluido-ar
θ_s	[K]	Temperatura superficial

O valor de h_c depende da velocidade, da viscosidade, da geometria e rugosidade da superfície e da diferença de temperatura entre o ar e a superfície. A obtenção do h_c é de tal forma complexa, que a equação 13 deverá ser lida como a definição do h_c em função da densidade de fluxo de calor e da

diferença de temperatura [2]. No entanto, o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção é, de forma simplificada, definido em função da velocidade do vento na envolvente exterior do edifício, existindo várias formulações.

2.2. MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE

De forma a quantificar e avaliar o transporte simultâneo de calor e de humidade em elementos construtivos porosos, frisando a interdependência destes dois transportes, vários modelos higrotérmicos têm sido formulados e melhorados, dos quais se destacam os de Luikov, Philip e De Vries, e Kunzel.

Luikov e Philip De Vries definem como impulsionador de transporte, o gradiente de teor de humidade e o gradiente de temperatura do material. O transporte de água, no modelo de Luikov e Philip De Vries, é expresso por [10]:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d}{dx} \left(Dw \frac{dw}{dx} + Dt \frac{dT}{dx} \right) \quad [14]$$

e o transporte de calor por:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{dw}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \right) \quad [15]$$

Em que

w	[kg/kg]	Teor de humidade
T	[°C]	Temperatura
Dw	[m²/s]	Coeficiente de difusividade hídrica
Dt	[m²/(s·K)]	Coeficiente de difusividade higrotérmica
ρ	Kg/m³	Massa volúmica equivalente
C	J/(kg·K)	Capacidade calorífica equivalente
λ	W/(m·K)	Condutibilidade térmica equivalente

A equação 14 evidencia que o transporte de água é influenciado parcialmente pelo gradiente de teor de humidade junto com a difusividade hídrica dos materiais, e parcialmente pelo gradiente de temperatura junto com a difusividade higrotérmica dos materiais. A equação 15 tem em conta a influência da humidade no comportamento térmico e propriedades térmicas do material.

Este modelo, embora apresente soluções exatas para bastantes casos, tem as suas limitações [11]:

- O modelo apresenta limitações relativamente aos materiais: é considerado que a estrutura dos materiais é indeformável, sendo estes também isotrópicos (possuem as mesmas propriedades físicas independentemente da direção considerada) e macroscopicamente indeformáveis;
- O perfil do teor de humidade no elemento construtivo apresenta descontinuidades nas interfaces das camadas, pois estas são constituídas de materiais diferentes e apresentam, consequentemente, comportamentos higroscópicos diferentes;
- No modelo, o coeficiente de difusividade hídrica e o coeficiente de difusividade higrotérmica são dependentes de dois gradientes (teor de humidade e temperatura) sendo difícil determinar esta dependência dupla experimentalmente, comprovado por Da Cunha e Daian [12].

A maior limitação do modelo é a descontinuidade do potencial do transporte de humidade-teor de humidade-assim, os modelos de transporte mais recentes são resultado da alteração do mesmo. Kunzel definiu como impulsor a humidade relativa, obtendo um modelo que considera a descontinuidade do teor de humidade nas interfaces e por isso, a resolução do mesmo por métodos analíticos é impossível, uma vez que as equações do transporte não são lineares e apenas numericamente resolúveis [11].

No modelo de Kunzel, o transporte de calor e humidade é dado, respetivamente, por [6]:

$$\frac{dH}{dT} \frac{dT}{dt} = \text{div}(\lambda \text{grad } T) + L_v \text{div}[\delta_p \text{grad}(\varphi \cdot p_s)] \quad [16]$$

$$\frac{d\rho_v}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \text{div}[D_\varphi \text{grad}\varphi + \delta_p \text{grad}(\varphi \cdot p_s)] \quad [17]$$

em que

H	[J/m ³]	Entalpia/ Calor específico do material
T	[°C]	Temperatura
λ	[W/m·K]	Coeficiente de condutibilidade térmica do material húmido
L_v	[J/kg]	Calor latente de evaporação de água
φ	[-]	Humidade Relativa
p_s	[Pa]	Pressão de saturação
ρ_v	[kg/m ³]	Teor de humidade
D_φ	[kg/m·s]	Coeficiente de transporte de água líquida
δ_p	[s]	Permeabilidade ao vapor de água

E o coeficiente de transporte de água líquida é obtido a partir do coeficiente de difusividade higríca, D_w e a derivada da curva higroscópica [6]:

$$D_\varphi = D_w \cdot \frac{d\rho_v}{d\varphi} \quad [18]$$

A equação referente ao transporte de calor (equação 16) tem, na sua parcela da esquerda, termos que tratam do armazenamento do calor, que incluem a capacidade calorífica do material e a capacidade calorífica da humidade presente no material. As duas parcelas à direita definem o transporte de calor no material: a primeira parcela corresponde à lei de Fourier em que o fluxo de calor é dado em função do gradiente de temperatura e do coeficiente de condutibilidade térmica do material húmido. A segunda parcela refere-se ao transporte de calor através do vapor de água: a água presente num ponto evapora, absorvendo o calor latente nesse ponto, movendo-se por difusão até outro ponto, onde condensa e liberta o calor latente anteriormente absorvido.

Na equação 17, análogamente à primeira, a parcela da esquerda, define o armazenamento de água no material, que corresponde à derivada da curva higroscópica do material. Do lado direito da equação, está representado o transporte de água na fase líquida (primeira parcela da soma) e o transporte de água na fase de vapor (segunda parcela da soma). A fase líquida trata do transporte por difusão superficial e por capilaridade, que é potenciado pela humidade relativa e depende pouco da temperatura. Já o transporte em fase de vapor, também potenciado pela humidade relativa, tem uma maior dependência

da temperatura, uma vez que, pela análise do diagrama psicrométrico, conclui-se que a pressão de saturação aumenta exponencialmente com a temperatura.

Madêra et al [13] apresentaram, em 2015, um novo modelo melhorado de Kunzel (K na figura 6) referido como Enhanced Kunzel's Model (EK na figura 6). A alteração ao modelo consistiu em distinguir, de forma mais precisa, a fase vapor e a fase líquida na transferência de humidade, com a implementação de uma função de transição. O impulsor do transporte definido foi a pressão de vapor de água, como no modelo de Luikov e Philip De Vries, melhorando a estabilidade numérica e tempo de computação neste novo modelo. A nível das equações, a alteração correspondeu à introdução de dois coeficientes de transição: *A* para a fase líquida e *B* para a fase de vapor, ambos entre 0 e 1, de forma a atribuir pesos às parcelas correspondentes às fases diferentes. O modelo novo, para o mesmo caso de estudo (Parede de 70cm de Arenito), resultou em humidades relativas superiores e consequentemente temperaturas mais baixas, comparativamente ao modelo de Kunzel (figura 6).

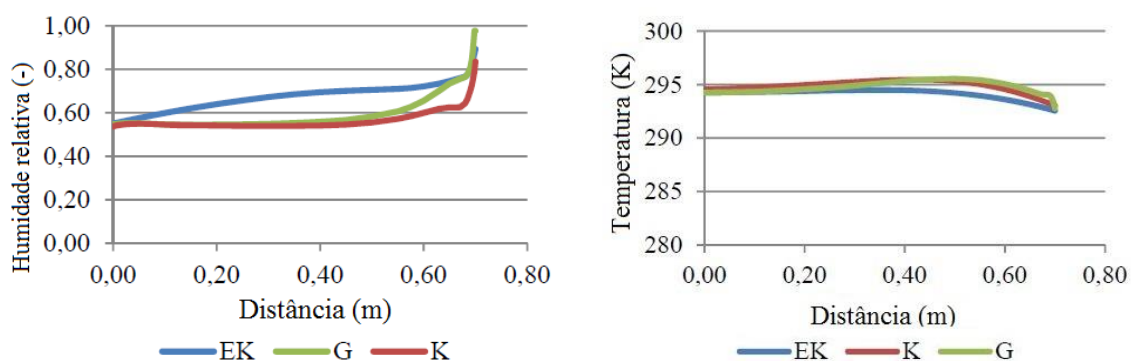


Figura 6- Perfil de humidade relativa(esquerda) e perfil de temperatura(direita) conseguidos por três modelos: EK-modelo melhorado, K-modelo de Kunzel, G-modelo de Grunewald (adaptado de [11])

2.3. WUFI 2D

2.3.1. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA

Geralmente, os materiais porosos utilizados na construção têm propriedades que não são constantes e que variam com as condições ambientais (interiores e exteriores), por isso, as equações dos modelos são não-lineares e apenas numericamente resolúveis - a resolução corresponde a um processo iterativo em que as equações individuais são resolvidas repetidamente e sucessivamente [11].

Assim sendo, a resolução numérica dos modelos de transferência de calor e humidade é conseguida pela sua incorporação em programas de simulação higrotérmica, existindo um vasto leque de programas, cada um associado a um modelo diferente. O output destes programas corresponde à discretização espacial e temporal do comportamento do calor e humidade num dado elemento construtivo. Ramos et al [14] referem a catorze dos vários programas de simulação, mencionando os seus métodos de funcionamento e para que casos se adequam, tendo realizado uma breve análise comparativa dos mesmos: 1D-HAM, BSim2000, DELPHIN 5, EMPTIED, GLASTA, hygIRC-2D, HAM Lab, HAM-Tools, IDA-ICE, MATCH, MOIST, MOISTURE-EXPERT, UMIDUS e WUFI.

De todos, o WUFI, cujo modelo de transporte utilizado é o de Kunzel, é o mais abrangente, possuindo vários programas direcionados para diferentes objetivos e casos de estudo [7]:

- WUFI Pro - efetua os cálculos higrotérmicos em apenas uma direção a partir de um corte transversal (de uma parede ou cobertura);

- WUFI Plus - é o programa mais completo na família WUFI pois, para além de simular o comportamento do elemento construtivo, simula o ambiente interior, fornecendo resultados relativamente ao conforto térmico e eficiência energética do edifício;
- WUFI 2D - realiza os mesmos cálculos que o WUFI Pro, embora em duas direções(2D), também a partir de um corte, adequando-se ao estudo de pontes térmicas, como por exemplo, um cunhal. Comparativamente ao WUFI Pro, apresenta inputs mais complexos e um tempo de computação superior;
- WUFI-Passive - efetua um balanço energético mensal, respeitando os critérios de Passivhaus presentes no EN 13790. Realiza, também, os mesmos cálculos que WUFI Plus aplicados aos critérios de Passivhaus.

2.3.2. MODELO DE FUNCIONAMENTO

No fluxograma seguinte (figura 7), está representado o conjunto de dados de entrada no modelo do WUFI, o seu percurso e tratamento e por fim, os resultados gerados pelo modelo. Consegue-se observar que o processo é iterativo, implicando a verificação de convergência e se necessário, quando não se verifica a convergência, a repetição do cálculo. Se houver convergência, o resultado é apresentado. Por este estudo usar como ferramenta o WUFI 2D, serão analisados os dados de input, o tratamento dos dados e o output da simulação.

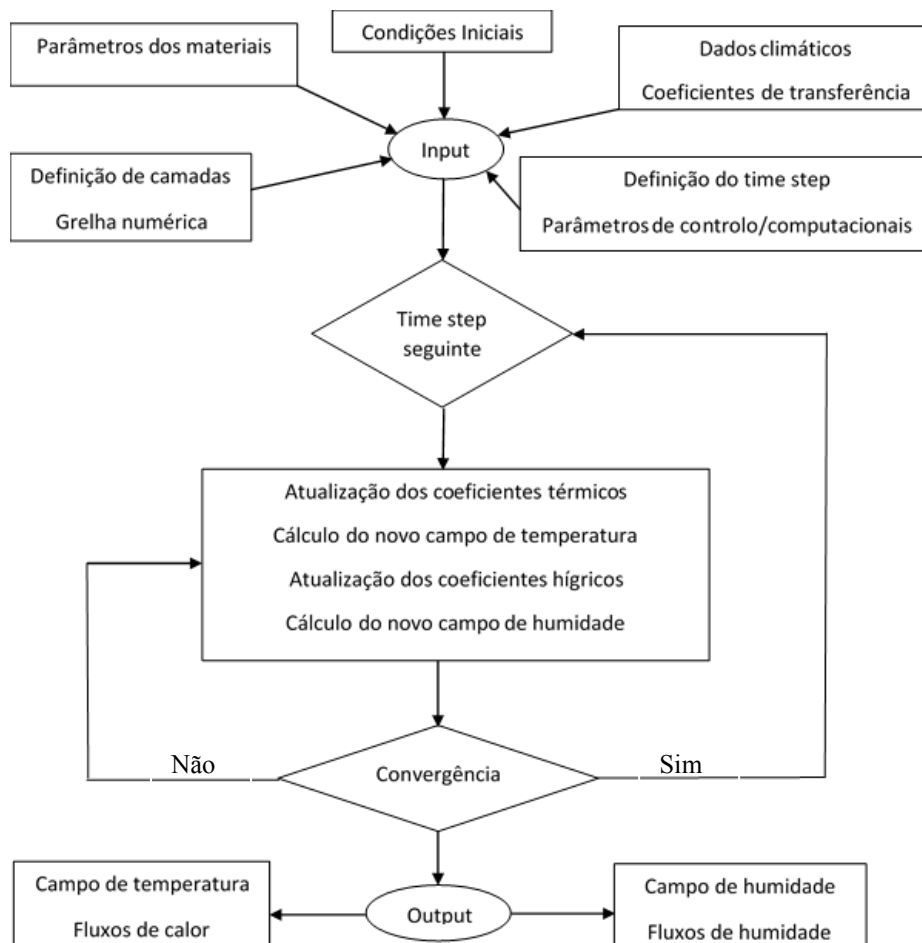


Figura 7- Fluxograma adaptado do WufiWiki [7]

2.3.3. DADOS DE ENTRADA

Geometria- O primeiro dado introduzido corresponde a um conjunto de retângulos onde, atribuindo-se as respectivas dimensões (em mm) e localização, é possível gerar uma representação gráfica do elemento construtivo em estudo (definição de camadas na figura 7). É definido, para cada retângulo, a sua largura, a sua altura, e as coordenadas do ponto inferior esquerdo do mesmo, representado, respetivamente, por (lx, ly, x, y) .

Malha numérica- Para a resolução numérica das equações diferenciais, é necessário a definição de uma malha. Assim, sobre a geometria, define-se o número de elementos na direção x e y em que se dividirá o elemento construtivo: quanto mais elementos se definem, menor serão as suas dimensões, aumentando a precisão da solução numérica obtida.

Materiais- A base de dados do WUFI contém uma panóplia de materiais diferentes, estando associado a cada um destes uma breve descrição, as propriedades variáveis em função da temperatura e da humidade e as propriedades do material seco. As propriedades do material seco são [15]:

- Massa Volúmica (ρ) [kg/m^3] - Quociente entre a massa e o volume do material, sendo medido com recurso a normas, por exemplo, EN 772-12 para blocos de alvenaria e EN 12390-7 para betão endurecido;
- Porosidade (ε) [m^3/m^3] - Indica o volume de vazios existente num metro cúbico de material, sendo este também conseguido utilizando normas: a EN ISO 10545-3 é usada para revestimentos cerâmicos;
- Calor específico (c_s) [J/kgK] - É também chamado de capacidade calorífica e é determinado baseando-se no “princípio da igualdade das trocas de calor” indicado na norma ASTM C 351-92b;
- Condutibilidade térmica (λ) [W/mK] - Representa, para um dado material, “a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente um provete desse material com faces planas e paralelas, por unidade de tempo e espessura, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário entre as duas faces” [4]. É utilizado o método Guarded-Hot-Plate para a sua obtenção, especificado nas normas ISO 8302 e NP 2254;
- Permeabilidade ao vapor de água (δ_p) [-] - Corresponde à capacidade de um material permitir que o vapor de água o atravesse, sendo obtido através da norma EN ISO 12572.

As propriedades variáveis em função da temperatura e da humidade são:

- Coeficiente de transporte líquido de sucção [m^2/s], coeficiente de transporte líquido de redistribuição [m^2/s] e condutibilidade térmica [W/mK] em função do teor de humidade [kg/m^3];
- Fator de resistência à difusão de vapor de água [-] em função do teor de humidade [-];
- Condutibilidade térmica [W/mK] e calor específico [J/kg] em função da temperatura [$^{\circ}\text{C}$].

Condições iniciais- Deve ser indicado, para cada camada ou componente de material diferente, as suas condições iniciais: temperatura inicial, teor de humidade inicial, e humidade relativa inicial. Por defeito, o programa atribui a todas as camadas/componentes a humidade relativa de 80% e o teor de humidade correspondente a essa humidade relativa, retirada da curva higroscópica do material em questão. A temperatura inicial considerada por defeito é de 20°C .

Condições fronteira/Clima- É possível definir três tipos de fronteira/superfícies no elemento construtivo: fronteira com o restante elemento construtivo, também chamada de fronteira adiabática (não existe transferência de calor ou humidade através desta superfície), fronteira com um clima exterior/ superfície exterior e fronteira com um clima interior/superfície interior. Apenas estas duas

últimas requerem a introdução ou escolha de parâmetros. A definição das fronteiras com um clima associado implica a definição do clima, dos coeficientes de transferência superficial e, unicamente para a fronteira com clima exterior, a orientação da superfície.

Para o clima interior, é escolhido uma das quatro representações: Curvas sinusoidais e três ficheiros, resultados da aplicação de três diferentes normas (ISO 13788, EN 15026/WTa 6-2 e ASHRAE 160) a um dado clima exterior.

A opção das curvas sinusoidais apresenta três curvas sinusoidais de condição interior, que correspondem a higrotermia fraca, média e forte. Além disso, é possível definir, pelo utilizador, a configuração das curvas de temperatura e humidade relativa, introduzindo para cada uma, o valor médio [$^{\circ}\text{C}$ ou %], a amplitude [$^{\circ}\text{C}$ ou %] e o dia em que se atinge o valor máximo[mês/dia].

O uso da norma ISO 13788 implica a seleção do local do clima exterior e da classe de humidade/higrotermia interior.

Com o uso do ficheiro de clima derivado do EN 15026/WTa 6-2, é apenas necessário escolher o local do clima exterior e a higrotermia do clima interior em causa (forte, média, média+5% e fraca) e também a atribuição opcional de um desvio/amplitude da temperatura interior.

A utilização do ficheiro ASHRAE 160 exige a introdução de dados relativamente ao equipamento e função da fração: o tipo de ar condicionado utilizado no interior (somente aquecimento, Ar condicionado e Ar condicionado com desumidificação) - indicando a temperatura máxima, temperatura mínima, desvio/amplitude da temperatura e humidade relativa máxima garantidas com a adoção do mesmo; o número de quartos; a indicação da existência ou não de banheiras com produção excessiva de vapor de água, sem exaustão; a taxa de produção de vapor de água [kg/s]; a taxa de renovação do ar [h^{-1}], introduzindo um valor ou seleccionando o tipo de construção(normal ou estanque) e por fim, o volume do edifício.

Para um clima exterior, associado a uma superfície exterior, a sua definição é feita ou utilizando a curva sinusoidal, ou, de forma mais precisa, seleccionando o ficheiro do clima a partir do mapa ou definindo um ficheiro anteriormente introduzido pelo utilizador. Os parâmetros climáticos que deverão ser incluídos, numa base horária e para um ano, são temperatura do ar [$^{\circ}\text{C}$], humidade relativa do ar [-], radiação solar (global, direta, difusa ou medida) [W/m^2], chuva (normal ou medida) [$\text{litro/m}^2\text{h}$], direção do vento [$^{\circ}$], velocidade do vento [m/s], pressão do ar [hPa] e nebulosidade [-]. É também necessário a longitude [$^{\circ}$], latitude [$^{\circ}$] e altitude da zona a ser representada pelo ficheiro.

Os coeficientes de transferência superficial de calor e humidade são definidos da seguinte maneira:

- Para uma superfície interior, o valor da condutância térmica superficial toma um valor padrão para a condição de superfície interior ($8\text{W/m}^2/\text{K}$) e o S_d - espessura da camada de ar de difusão equivalente [m] - é atribuído conforme o tipo de revestimento interior escolhido de uma lista pré-definida, sendo também permitido definir, pelo o utilizador, o valor destes coeficientes;
- Para uma superfície exterior, o valor da condutância térmica superficial toma um valor padrão para a condição de superfície exterior ($17\text{W/m}^2/\text{K}$) ou um valor definido pelo utilizador, seleccionando se este depende ou não do vento, pelo que o valor da condutância térmica superficial é dado pela soma de uma parcela relativa à radiação e outra relativa à convecção, sendo esta última influenciada pelo vento.

Os coeficientes de absorção e emissão da superfície [-], que tomam valores padrão de 0,2 e 0,9, podem ser atribuídos de acordo com o material selecionado, ou, definidos pelo utilizador. O coeficiente de reflexão da terra/albedo [-] apresenta valor padrão de 0,2 também podendo tomar outros valores. Pode-se realizar ou não o balanço radiativo explícito. O valor do S_d [m] é atribuído, também conforme o tipo

de revestimento exterior escolhido de uma lista pré-definida, sendo também permitido definir, pelo utilizador, o seu valor. Por fim, é definida a fração de chuva incidente [-] que toma o valor de 0,7 se este depender da inclinação da superfície, 0 se não houver incidência nenhuma da chuva, ou um valor definido pelo utilizador.

É definida pelo utilizador, uma orientação (azimute), em graus, e inclinação, também em graus, para a superfície exterior: estes tomam como valor padrão 180° e 90°, respetivamente (*i.e.*, a superfície encontra-se virada a norte e na vertical). Ainda na definição da orientação, é permitida a atribuição de parâmetros de incidência de chuva, conforme o tipo de superfície, escolhido de uma lista pré-definida. A chuva incidente pode também ser calculada de acordo com a norma ASHRAE 160, sendo neste caso necessária a indicação da altura do edifício, o tipo de proteção da superfície e a classe de exposição à chuva.

Fontes- Sobre a representação do elemento construtivo e a malha numérica definida, é possível definir qualquer elemento da malha como uma fonte de calor, humidade ou ar, selecionando o elemento da malha e escolhendo o tipo de fonte. O programa requer, para todos os tipos de fonte, a fronteira associada e, exclusivamente para as fontes de humidade, a fração de chuva incidente [%], ou alternativamente, um ficheiro que defina a produção de água [kg/(s·m)] ao longo do tempo [h]; para as fontes de calor, a fração de radiação solar incidente [%] ou alternativamente, um ficheiro que defina a quantidade de calor [W/m] ao longo do tempo [h]; e, por fim, para as fontes de ar, o valor de taxa de renovação de ar [1/h], ou um ficheiro que defina a taxa de renovação de ar [1/h] ao longo do tempo [h]. É de notar que caso um ficheiro contenha dados para um número de horas inferior ao período da simulação, este é repetido até ao final da simulação.

Dados computacionais- É definido para a simulação: a data de início da simulação e a sua duração, em *time steps*, sendo que um *time step* corresponde a uma hora; o modo de cálculo, permitindo o cálculo exclusivo do transporte de humidade, do transporte de calor, ou dos dois em simultâneo; a utilização ou não do calor latente de evaporação, calor latente de fusão e condução capilar no cálculo higrotérmico; a divisão opcional dos *time steps* em *sub-time steps*, usado no caso do programa encontrar erros na resolução numérica das equações; a precisão (média, melhorada, elevada ou definida pelo utilizador) e convergência (fraca, forte ou definida pelo utilizador) da resolução numérica das expressões; e, por fim, os dados apresentados no ficheiro de resultados: teor de humidade, humidade relativa, temperatura, pressão de vapor de água, densidade do fluxo de água por capilaridade, densidade do fluxo de água por difusão e densidade fluxo de calor. Relativamente ao processo iterativo da resolução das equações, existe também a opção de “Enhanced Computational Parameters” em que todos os seus parâmetros são alteráveis.

2.3.4. DADOS DE SAÍDA

As iterações feitas e os erros residuais da resolução numérica (*theta* para a temperatura e *phi* para a humidade) são apresentados enquanto a simulação é executada. O WUFI 2D apresenta os seus resultados em dois formatos: vídeo-WUFI 2D Motion e gráfico-WUFI Graph.

O WUFI 2D Motion apresenta quatro animações, correspondentes à variação de quatro resultados (temperatura, humidade relativa, teor de humidade e pressão de vapor de água) no elemento construtivo (exemplo na figura 8). Estas têm a duração igual ao período de simulação definido, sendo possível selecionar um *time step* e visualizar o comportamento do calor e humidade nesse preciso momento. A variação destes parâmetros no elemento construtivo é visível devido à atribuição de um esquema de cores a diferentes intervalos de valores desses mesmos parâmetros. O programa indica, para qualquer

elemento da malha sobre o elemento construtivo, a sua largura, comprimento e o valor para o parâmetro em causa.

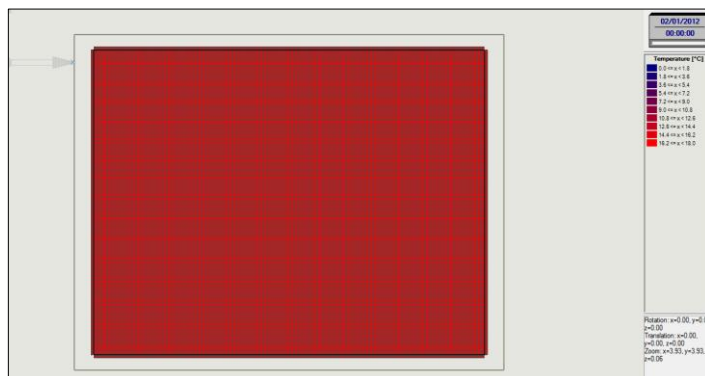


Figura 8 - Perfil de temperatura no Wufi 2D Motion

WUFIGraph apresenta os mesmos resultados em forma de gráficos com a variação no tempo dos vários parâmetros para o período de simulação (exemplo da temperatura na figura 9). Do WUFIGraph resultam gráficos de temperatura, de humidade relativa, de teor de humidade, de isopletas, que indicam a possibilidade do desenvolvimento de organismos como bolor, e por fim, isolinhas, que indicam os pontos em que os parâmetros apresentam igual valor.

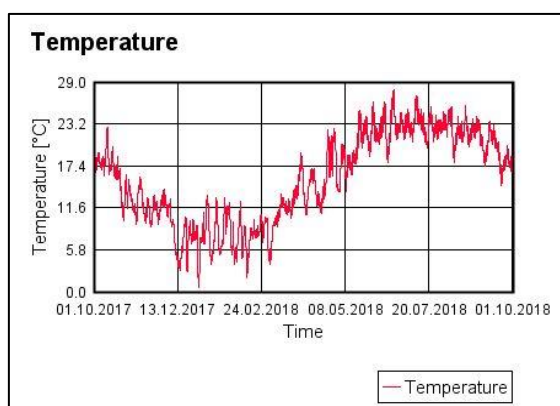


Figura 9- Gráfico de temperatura no WUFIGraph

Para a obtenção dos gráficos, é necessário escolher o parâmetro a estudar e seleccionar os elementos da malha numérica sobre o elemento construtivo das quais se quer os resultados, podendo seleccionar camadas, materiais, ou zonas de interesse no elemento construtivo. O valor obtido será resultado de uma média pesada dos vários elementos que compõem a área seleccionada. Por norma, o gráfico conseguido representa a variação do parâmetro durante a totalidade do período da simulação, podendo ser alterado para um espaço de tempo definido pelo utilizador.

3

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO WUFI 2D

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De forma a estudar de que maneira o programa WUFI 2D 4.0 se comporta perante a alteração de certos parâmetros e propriedades, realizou-se um conjunto de simulações, seguido da análise dos resultados obtidos. O programa adequa-se ao estudo de fluxos de calor e humidade em duas direções e como anteriormente referido, é ideal para o estudo de pontes térmicas. Segue-se a descrição do caso de estudo, a indicação dos parâmetros utilizados, a apresentação dos resultados das simulações e a sua discussão. Na apresentação dos resultados para todas as simulações, são usados os gráficos que melhor evidenciam o fenómeno em estudo, encontrando-se os restantes gráficos no anexo I.

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. CASO DE ESTUDO

Foi definido um caso base, alvo de variações dos diferentes parâmetros analisados. Uma vez que o WUFI 2D se adequa ao estudo de fluxos de calor e humidade em duas direções, definiu-se uma ponte térmica, correspondente a um cunhal composto por um pilar de betão e panos de alvenaria rebocadas, com isolamento pelo exterior.

A definição da geometria da peça resultou da composição de nove retângulos (figura 10):

- Reboco exterior de espessura 0,5cm- dois retângulos: um com 5mm de largura e 545mm de altura; um com altura de 5mm e 640mm de largura (R1 e R2);
- Isolamento térmico exterior com 4cm de espessura-dois retângulos: um com 40mm de largura e 540mm de altura; um com altura 40mm e 600mm de largura (R3 e R4);
- Pilar de betão de 30cm x 20cm-um retângulo de 300mm de largura e 200mm de altura (R5);
- Panos de alvenaria de tijolos de 20cm- dois retângulos: um com 200mm de largura e 300mm de altura; um com altura de 300mm e 200mm de largura (R6 e R7);
- Reboco interior de espessura 1cm- dois retângulos: um com 10mm de largura e 300mm de altura; um com altura de 10mm e 390mm de largura (R8 e R9).

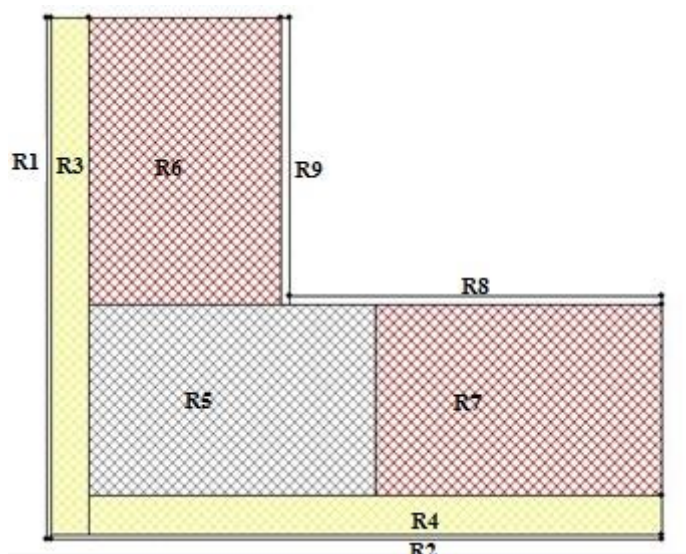


Figura 10 - Definição da geometria no WUFI 2D

O quadro 1 indica as propriedades dos materiais e as suas geometrias correspondentes.

Quadro 1- Propriedades dos materiais usados no caso de estudo retirados da base de dados do WUFI

Material	Massa Volumica [kg/m ³]	Porosidade [m ³ / m ³]	Calor Especifico [J/kgK]	Condutibilidade e térmica [W/mK]	Resistência à difusão [-]	Retângulo
Reboco Exterior – Acrílico	1100	0.12	850	0.7	1000	R1,R2
Isolamento térmico - Lã mineral	60	0.95	850	0.04	1.3	R3,R4
Betão	2220	0.18	850	1.6	248	R5
Tijolo	600	0.77	850	0.12	16	R6,R7
Reboco Interior	850	0.65	850	0.2	8.3	R8,R9

As condições iniciais atribuídas a todos os materiais do elemento construtivo, por padrão, correspondem à temperatura de 20°C e humidade relativa de 80%. Sendo a humidade relativa inicial igual para todos os materiais, e tendo estas curvas higroscópicas diferentes, o teor de humidade inicial é diferente para cada um.

Na figura 11 estão indicadas as superfícies do elemento construtivo e os seus climas associados: as duas superfícies associadas ao reboco exterior são consideradas superfícies exteriores (azul); as duas superfícies associadas ao reboco interior são consideradas como superfícies interiores (vermelho) e as

duas superfícies que separam o cunhal da restante construção são consideradas superfícies adiabáticas (verde).

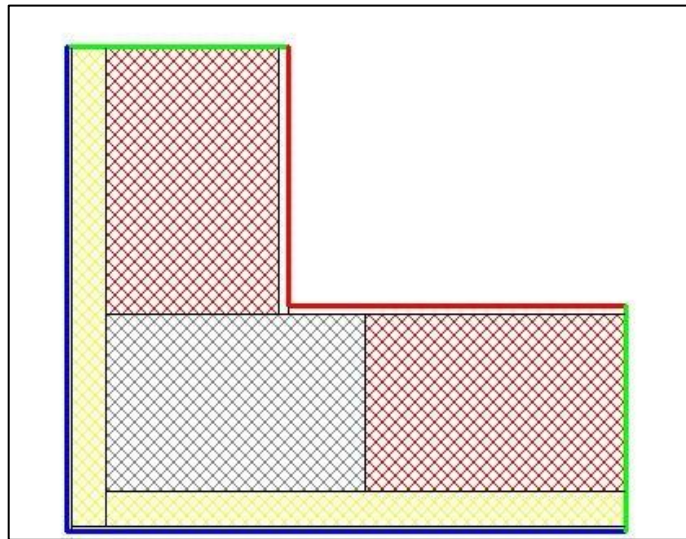


Figura 11 - Superfícies do elemento construtivo

Relativamente às superfícies interiores, ambas têm o mesmo clima e coeficientes superficiais de transferência:

- São usadas as curvas sinusoidais de higrometria média para a definição do clima interior, sendo os valores médios da temperatura e humidade relativa 21°C e 50%, e as suas amplitudes 1°C e 10%, respetivamente;
- A condutância térmica superficial toma o valor padrão para superfície interior de 8W/m²K e a espessura da camada de ar de difusão equivalente S_d é 0m (i.e, a superfície interior não tem nenhum revestimento que restrinja a difusão de vapor).

Para as superfícies exteriores, foram atribuídos os mesmos climas e coeficientes superficiais de transferência, no entanto, uma superfície está orientada a Norte e a outra a Oeste:

- O clima exterior de “Lisbon; FEUP University of Porto” foi selecionado a partir do mapa/ficheiro;
- A condutância térmica superficial toma o valor padrão para superfície exterior de 17W/m²K e é considerada independente do vento. Os coeficientes de absorção e emissão são os definidos por defeito para uma superfície clara: 0.2 e 0.9. Para o albedo adotou-se 0.2. Optou-se por não realizar o balanço radiativo explícito. Tal como para a superfície interior, o S_d toma o valor de 0m. Para fração de chuva incidente assumiu-se 0.7;
- As superfícies apresentam orientações diferentes e ambas com inclinação de 90° (i.e verticais). Para o propósito do cálculo de chuva incidente, é definido que a altura do cunhal não ultrapassa 10 metros e que o cálculo não é efetuado de acordo com a norma ASHRAE 160.

Para o período de cálculo do caso de estudo, definiu-se um ano (8760 *time steps*), com início em 01/01/2017. Ambas as equações de transporte, humidade e calor, foram utilizadas. Como padrão, o cálculo numérico das expressões tem precisão média e convergência fraca.

Para todas as simulações realizadas, definiram-se 23 pontos (figura 12), associados a interfaces no elemento construtivo, para os quais se retiraram os valores da humidade relativa e temperatura em todos os instantes do período de simulação (um ano); é a partir destes valores que se analisa a variação dos

diferentes parâmetros, calculando as diferenças relativas, reais e absolutas, dos resultados obtidos nas várias simulações

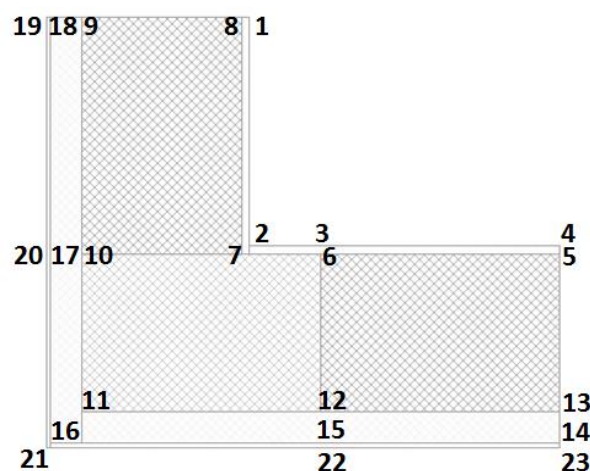


Figura 12- Pontos definidos para a extração dos resultados

O WUFI 2D não permite a obtenção de resultados em pontos, mas sim em elementos da malha numérica. Dado que se pretendeu extrair resultados para pontos específicos e não para diferentes elementos da malha na qual se divide o elemento construtivo, considerou-se que o resultado obtido para cada ponto corresponde à média ponderada dos resultados dos elementos da malha circundantes. O quadro 2 exemplifica o cálculo da temperatura para um ponto contido entre quatro elementos da malha numérica.

Quadro 2- Extração de temperatura num ponto

		Área[mm ²]	Temperatura[°C]	Média ponderada[°C]
Elementos selecionados individualmente	1	196.1	15.39	15.14
	2	368.3	15.43	
	3	156.3	14.55	
	4	83.3	14.43	

3.2.2. SIMULAÇÃO INICIAL-DEFINIÇÃO DA MALHA

Relativamente ao caso de estudo, resta definir o número de elementos da malha nas direções x e y, em que se dividirá o elemento construtivo. Visto que quantos mais elementos se definirem, menores serão as suas dimensões e maior será o número de resultados para o mesmo elemento construtivo, é importante analisar em que sentido a variação deste parâmetro influencia a precisão do resultado final para cada ponto e o tempo de simulação. Para isto, foi realizado um conjunto de simulações iniciais, de forma a definir a malha numérica a ser utilizada nas simulações seguintes. Os casos avaliados foram de malhas de: 20x20, 50x50, 100x100 e 200x200, correspondentes às simulações GI, GII, GIII e GIV, respetivamente, representados na figura 13.

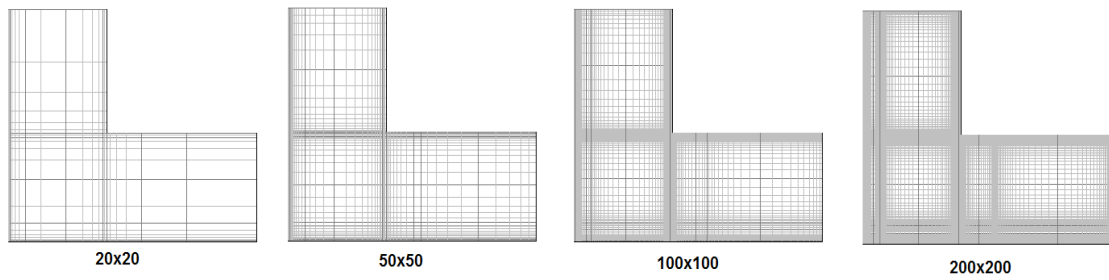


Figura 13 - Malhas numéricas simuladas

Realizadas as quatro simulações, obtiveram-se os resultados apresentados no quadro 3, em termos de tempo de processamento e tamanho do ficheiro de resultados.

Quadro 3- Resultados computacionais das simulações

Simulação	Tempo[min]	Tamanho[Mb]
GI	7	25
GII	23	125
GIII	126	475
GIV	978	1833

O tempo de processamento apresenta um aumento desmedido quando são utilizadas as malhas de 100x100 e 200x200. O mesmo se verifica para o tamanho do ficheiro resultante. Para cada simulação, foram extraídas as temperaturas (T) e humidades relativas (HR) nos 23 pontos para os 8760 *time steps*. Seguidamente, foi calculado a diferença relativa para cada resultado, usando os valores da simulação GIV como referência, partindo do princípio que estes eram os mais precisos. Na figura 14 estão representadas essas mesmas diferenças relativas, em valor absoluto, para os resultados de T e HR, nas simulações GI, GII e GIII.

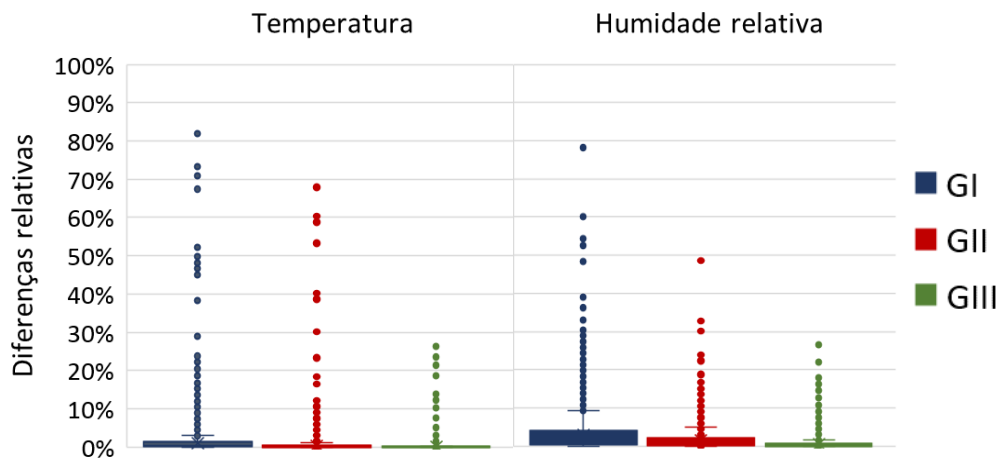


Figura 14 - Diferenças relativas dos resultados de T (esquerda) e HR (direita) nas simulações

Verifica-se na figura 14 o decréscimo das diferenças relativas média e máxima com o aumento do número de elementos da malha, tanto para os resultados de T como para os de HR. O quadro 4 indica as diferenças relativas médias e desvios padrão dos conjuntos de dados representados na figura 14.

Quadro 4-Médias e desvios padrão das diferenças relativas

		GI	GII	GIII
Temperatura	Média	1.1%	0.5%	0.1%
	Desvio Padrão	1.7%	1.0%	0.3%
Humidade relativa	Média	2.9%	1.6%	0.5%
	Desvio Padrão	4.0%	2.3%	0.1%

Adicionalmente ao que se observou nos *boxplots* da figura 14, conclui-se que o caso GIII resulta na menor diferença relativa média, tal como no menor desvio padrão, nos resultados de T e HR. Também se verifica que, no caso da humidade relativa, estas diferenças são de maior grandeza que as observadas no caso da temperatura, contudo, apresentam o mesmo comportamento: o decréscimo com o aumento do número de elementos da malha.

Uma vez que o uso da malha de 20x20(GI) conduz a tempos de processamento e dimensões de ficheiros reduzidos, esta malha será a adotada nas simulações efetuadas para a análise de sensibilidade do programa, uma vez que as diferenças entre os três tipos de malha face à malha GIV não são significativas, especialmente no que diz respeito à temperatura.

3.2.3. DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Nestas simulações, foram selecionados, na generalidade, parâmetros referentes às superfícies do elemento construtivo, não dando menos atenção a parâmetros como fontes de humidade. As simulações GI, SDI, HEI, RII, EI, OI e MSI (quadro 5) correspondem ao caso de estudo (caso base), apresentando, portanto, os mesmos resultados

A variação da espessura da camada de ar de difusão equivalente das superfícies interiores e exteriores foi efetuada de forma a analisar o comportamento do elemento face ao uso de revestimentos diferentes, escolhendo um valor máximo e realista para cada superfície. Uma elevada permeabilidade da superfície ao vapor de água traduz-se num Sd reduzido, e vice-versa.

Foi decidido não considerar o valor da condutância térmica superficial dependente do vento, sendo que para o seu estudo, foram adotados dois valores: o definido por defeito pelo programa e o estabelecido no ITE 50 [9].

Com a adoção de uma fração de chuva incidente nula (RI), é simulando o comportamento do elemento construtivo quando este se encontra completamente protegido da chuva.

Para as simulações referentes à variação do coeficiente de absorção de radiação solar, simulando a alteração da cor da superfície exterior, foram adotados três valores: uma cor clara corresponde a um coeficiente de absorção baixo, uma cor intermédia com valor intermédio e uma cor escura corresponde a um coeficiente alto. O valor padrão do programa é de 0.2, admitindo que a superfície tem cor clara.

As simulações efetuadas em relação à emissividade da superfície exterior têm como objetivo analisar o comportamento do elemento construtivo quando a sua superfície apresenta uma emissividade alta e

quando apresenta uma emissividade baixa. Uma maior emissividade da superfície implica maior perdas de calor por radiação (equação 9).

A alteração das orientações do elemento construtivo conduz a diferentes quantidades de calor recebido por radiação e diferentes quantidades de chuva incidente. Como se pode observar na figura 15, uma face virada para Norte recebe pouca radiação solar e pouca chuva, enquanto uma face virada para Sul recebe muita radiação solar e com bastante chuva incidente; uma face orientada para Este tem pouca chuva incidente e recebe radiação em quantidade moderada tal como uma face orientada para Oeste, embora esta tenha uma maior quantidade de chuva incidente.

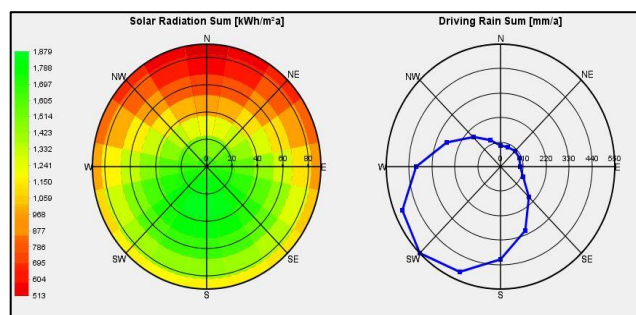


Figura 15 - Radiação incidente (esquerda) e chuva incidente (direita) para Lisboa (base de dados do WUFI)

Para o estudo das fontes, foi adotada uma fonte de humidade no canto interior do elemento construtivo (MSII), simulando uma fuga de água numa tubagem. Foi definido um caudal constante para todo o período da simulação de 0.0012kg/s·m.

O quadro 5 indica todas as simulações efetuadas no WUFI 2D, especificando os parâmetros alterados.

Quadro 5- Simulações efetuadas

Simulação	Valores dos parâmetros		Sigla
Espessura da camada de ar de difusão equivalente	Sd Interior	Sd Exterior	
	0	0	SDI
	0	1000	SDII
	10	0	SDIII
	10	1000	SDIV
Condutância térmica superficial	he exterior		
	17(Padrão)		HEI
	25(ITE50)		HEII
Fração de chuva incidente	%		
	0		RI
	70		RII
Coeficiente de absorção de radiação solar	Cor	α	
	Média	0.5	AI
	Escura	0.8	AII
	Padrão	0.2	AIII
Emissividade	ε		
	Alta	0.9	EI
	Baixa	0.06	EII
Orientação das faces do elemento	Face 1	Face 2	
	Norte	Oeste	OI
	Este	Norte	OII
	Sul	Este	OIII
	Oeste	Sul	OIV
Humidade	Quantidade[kg/(s·m)]		
	0		MSI
	0.0012		MSII

3.3. RESULTADOS

3.3.1. VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE

As temperaturas das diferentes camadas do elemento construtivo não foram significativamente afetadas pela alteração da espessura de camada de ar de difusão equivalente - S_d . As temperaturas máximas e mínimas atingidas nas simulações SDII, SDIII e SDIV não sofreram oscilações consideráveis, relativamente ao caso base (SDI). Assim, a figura 16 representa a evolução da temperatura, por camada, do elemento construtivo para a simulação SDI, tendo as restantes simulações resultados idênticos.

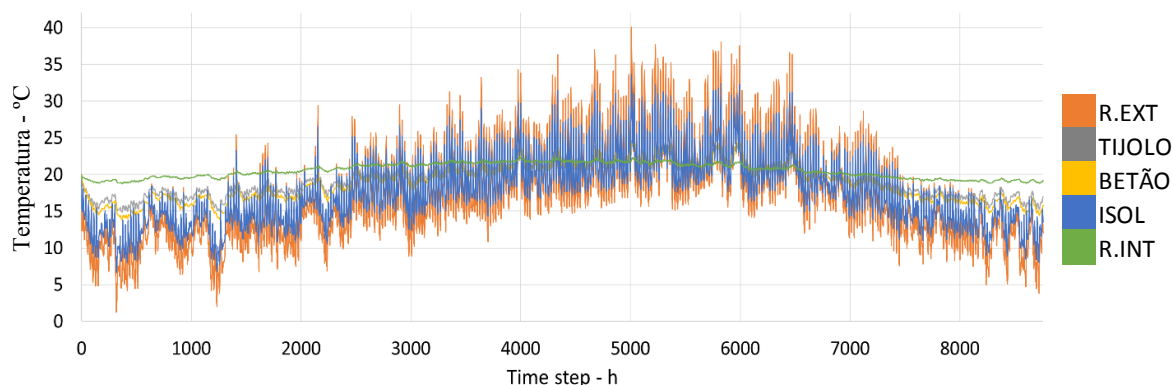


Figura 16-Evolução da temperatura na simulação SDI

Reforçando o que foi anteriormente concluído, os 23 pontos apresentam valores de temperatura praticamente iguais em SDI, SDII, SDIII e SDIV. A figura 17 representa as temperaturas em dois pontos: um no interior (ponto 2) e outro no exterior (ponto 21) do cunhal, confirmado a reduzida influência que o S_d tem nas temperaturas do elemento construtivo.

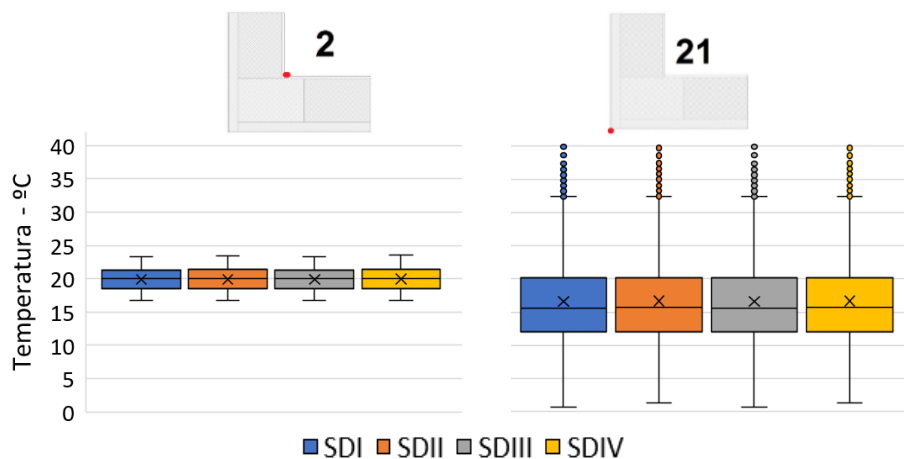


Figura 17 -Temperaturas dos pontos 2 e 21

A alteração do S_d da superfície causa maiores perturbações na humidade relativa do elemento construtivo, sendo perceptíveis as diferenças entre as quatro simulações. Os quatro gráficos seguintes representam a evolução da humidade relativa das diferentes camadas do elemento construtivo, nas simulações SDI (figura 18), SDII (figura 19), SDIII (figura 20), e SDIV (figura 21).

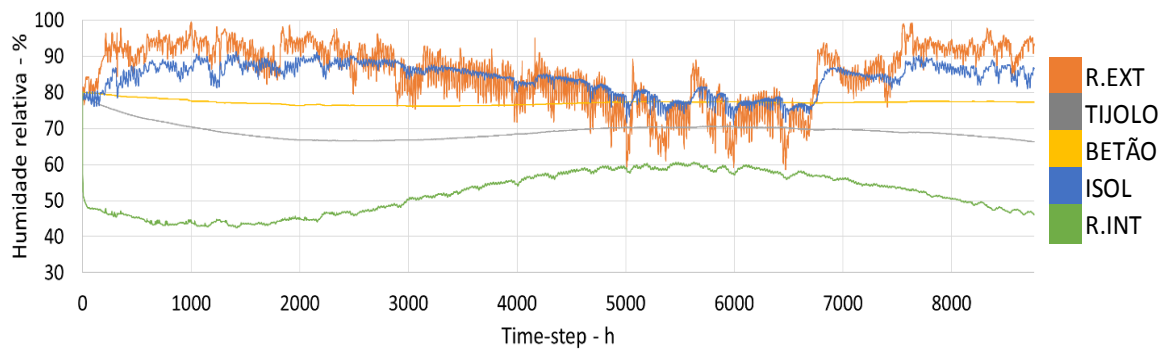


Figura 18- Evolução da humidade relativa na simulação SDI

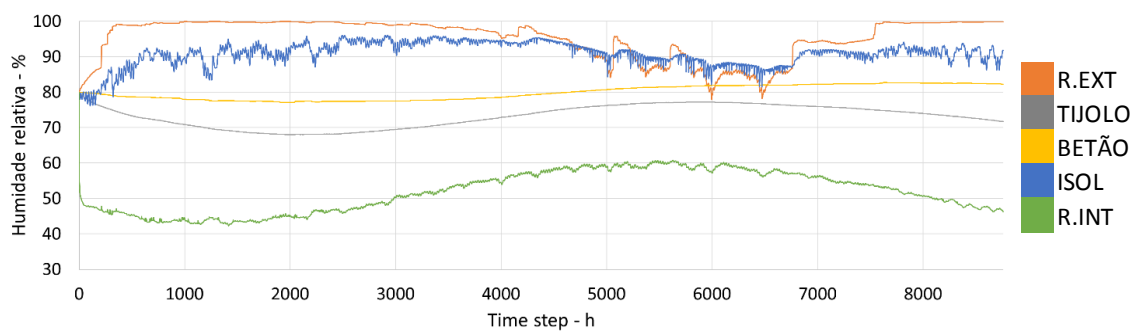


Figura 19- Evolução da humidade relativa na simulação SDII

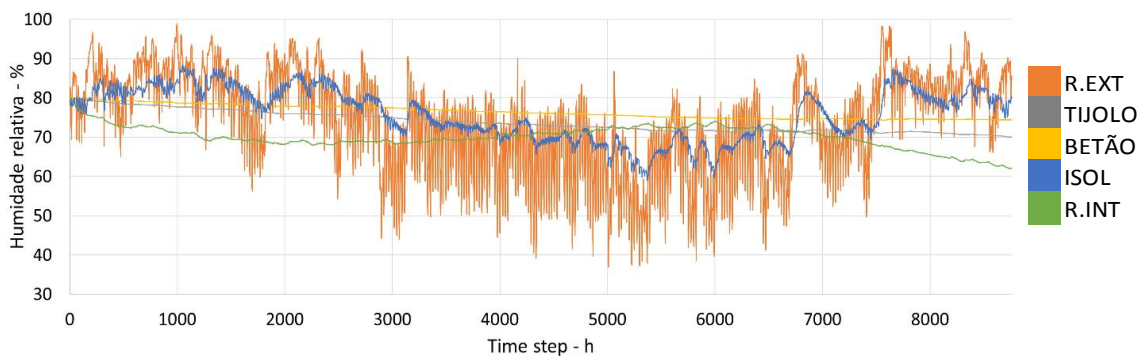


Figura 20- Evolução da humidade relativa na simulação SDIII

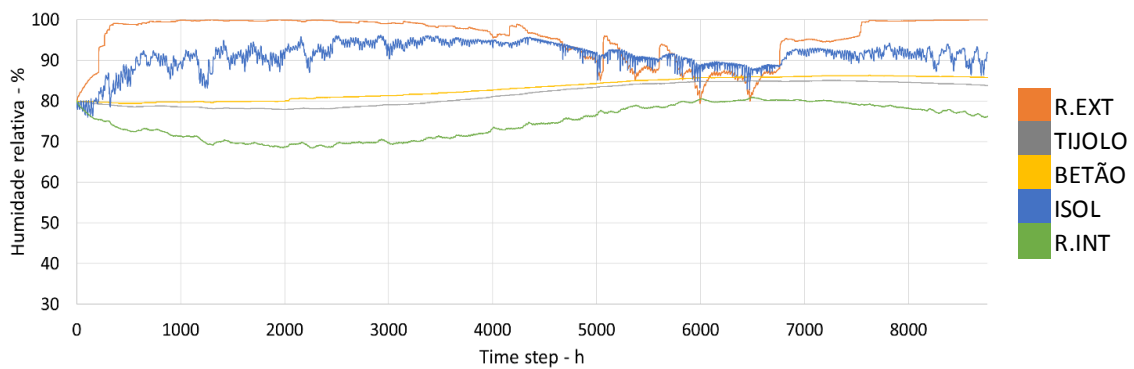


Figura 21- Evolução da humidade relativa na simulação SDIV

Conclui-se dos gráficos anteriores que a humidade relativa (HR) do reboco exterior evolui de forma mais variável, conforme o clima exterior, nas simulações SDI e SDIII, enquanto que nas simulações SDII e SDIV, onde o S_d da superfície exterior é elevado, evolui de forma mais estável. Com um S_d elevado, a passagem de vapor de água pela superfície exterior é dificultada, sendo a HR do reboco exterior pouco afetado pela humidade do clima exterior. O reboco interior apresenta nas simulações SDIII e SDIV, onde o S_d interior é elevado, valores de HR superiores às simulações SDI e SDII, uma vez que a secagem do reboco pelo interior é dificultada, pelo que o vapor de água tem a sua passagem impedida.

Nos pontos 1 a 8, correspondentes ao reboco interior, as quatro simulações apresentam a mesma distribuição de resultados: os valores de HR na simulação SDI e SDII são idênticos embora que na simulação SDII a superfície exterior apresente um S_d elevado e na simulação SDI não. Com isto, conclui-se que este parâmetro da superfície exterior não influencia os resultados de HR nas camadas interiores do elemento construtivo. Os resultados de HR do SDIII são, em comparação com os anteriores, consideravelmente maiores – nesta simulação apenas a superfície interior apresenta um S_d elevado, por isso, o elemento construtivo terá a sua secagem pelo interior dificultada. A simulação SDIV resulta nos maiores valores de HR para estes pontos, sendo que ambas as superfícies apresentam um S_d elevado, sendo por isso a secagem ainda mais dificultada que nas simulações anteriores.

Nos restantes pontos, de 9 a 23, as quatro simulações apresentam a mesma distribuição de resultados: as HR atingidas nas simulações SDI e SDIII são da mesma ordem de grandeza e as simulações SDII e SDIV resultam em valores de HR maiores e semelhantes entre si. Estas duas últimas simulações correspondem a um S_d elevado na superfície exterior, pelo que o elemento terá a sua secagem pelo exterior dificultada, influenciando a HR de maior parte do elemento construtivo. Pelo contrário, as simulações SDI e SDIII, onde a superfície exterior apresenta um $S_d=0m$, os valores de HR são mais baixos devido à secagem facilitada pelo exterior. Como exemplo, a figura 22 representa a HR em dois pontos: um no interior (ponto 2) e um no exterior (ponto 21) do cunhal.

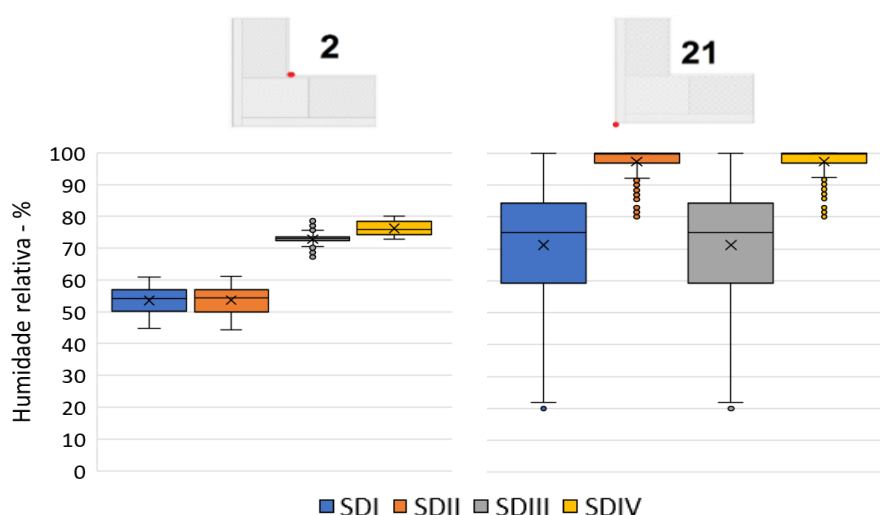


Figura 22- Humidade relativa nos pontos 2 e 21

As diferenças relativas médias dos resultados de temperatura e de humidade relativa nos 23 pontos, relativamente à simulação base (SDI) estão representadas no quadro 6, quantificando as diferenças atrás referidas.

Quadro 6- Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em SDII, SDIII e SDIV

Pontos	Temperatura						Humidade relativa						
	SDII		SDIII		SDIV		SDII		SDIII		SDIV		
Reboco interior	1	➡	0.0%	➡	0.0%	➡	0.0%	⬆	0.1%	⬆	37.0%	⬆	47.1%
	2	⬆	0.1%	⬆	0.1%	⬆	0.2%	➡	0.0%	⬆	36.7%	⬆	43.0%
	3	➡	0.0%	➡	0.0%	⬆	0.1%	➡	0.0%	⬆	38.6%	⬆	46.6%
	4	➡	0.0%	➡	0.0%	➡	0.0%	⬆	0.1%	⬆	39.5%	⬆	49.6%
	5	➡	0.0%	➡	0.0%	➡	0.0%	⬆	1.3%	⬆	36.5%	⬆	46.5%
	6	⬆	0.1%	➡	0.0%	⬆	0.1%	⬆	1.0%	⬆	34.3%	⬆	42.1%
	7	⬆	0.2%	⬆	0.2%	⬆	0.4%	⬆	1.3%	⬆	25.1%	⬆	30.3%
	8	➡	0.0%	➡	0.0%	➡	0.0%	⬆	1.3%	⬆	34.1%	⬆	44.2%
Reboco exterior	9	⬆	0.3%	⬆	0.3%	⬆	0.8%	⬆	21.6%	⬆	4.8%	⬆	23.4%
	10	⬆	0.2%	⬆	0.2%	⬆	0.5%	⬆	20.7%	⬆	2.9%	⬆	21.5%
	11	⬆	0.2%	⬆	0.2%	⬆	0.4%	⬆	23.0%	⬆	0.7%	⬆	23.0%
	12	⬆	0.3%	⬆	0.2%	⬆	0.6%	⬆	20.5%	⬆	3.6%	⬆	21.6%
	13	⬆	0.3%	⬆	0.3%	⬆	0.8%	⬆	21.7%	⬆	5.0%	⬆	23.3%
	14	⬆	0.4%	⬆	0.1%	⬆	0.5%	⬆	23.9%	⬆	3.4%	⬆	25.0%
	15	⬆	0.4%	➡	0.0%	⬆	0.5%	⬆	23.8%	⬆	2.3%	⬆	24.5%
	16	⬆	0.3%	➡	0.0%	⬆	0.3%	⬆	27.5%	⬆	0.6%	⬆	27.5%
	17	⬆	0.3%	➡	0.0%	⬆	0.3%	⬆	24.5%	⬆	1.8%	⬆	25.0%
	18	⬆	0.2%	⬆	0.1%	⬆	0.3%	⬆	23.8%	⬆	3.2%	⬆	25.1%
	19	⬆	0.3%	➡	0.0%	⬆	0.4%	⬆	39.3%	➡	0.0%	⬆	40.5%
	20	⬆	0.3%	➡	0.0%	⬆	0.3%	⬆	41.3%	➡	0.0%	⬆	41.8%
	21	⬆	0.3%	➡	0.0%	⬆	0.3%	⬆	47.0%	➡	0.0%	⬆	47.1%
	22	⬆	0.4%	➡	0.0%	⬆	0.4%	⬆	47.3%	➡	0.0%	⬆	47.9%
	23	⬆	0.4%	➡	0.0%	⬆	0.4%	⬆	46.8%	➡	0.0%	⬆	47.9%

3.3.2. VARIAÇÃO DA CONDUTÂNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL

A condutância térmica superficial diz respeito apenas à superfície exterior do elemento construtivo, definindo a quantidade de calor que esta recebe por condução. Para o caso base de a condutância térmica superficial ser de $17\text{W/m}^2/\text{K}$ (HEI), os resultados de T e HR obtidos correspondem aos mesmos da simulação SDI, expostos no §3.3.1. A simulação HEII, correspondente ao aumento da condutância térmica superficial para $25\text{W/m}^2/\text{K}$, resultou no seguinte comportamento de temperatura, representado na figura 23.

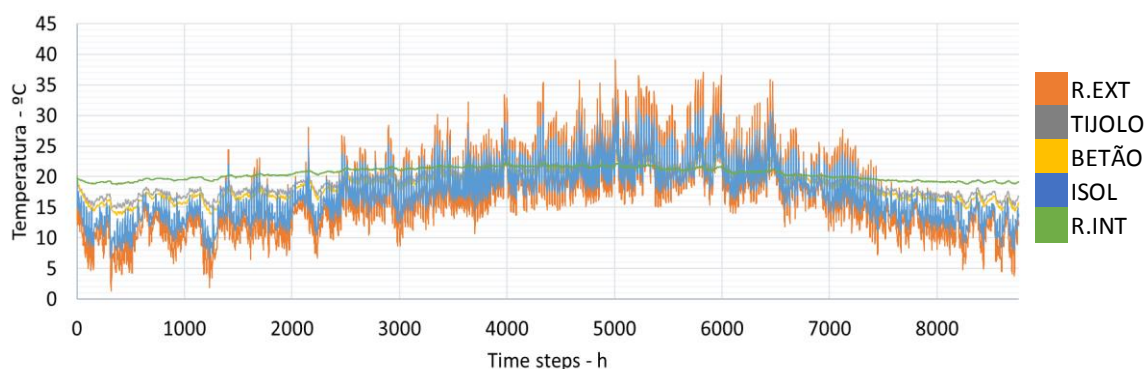


Figura 23- Evolução da temperatura para a simulação HEII

Comparativamente aos resultados da simulação HEI (figura 16), a temperatura máxima atingida no reboco exterior é ligeiramente inferior na simulação HEII, onde o valor da condutância superficial é superior. Excetuando esta diferença, os resultados de temperatura são bastante idênticos, sendo ligeiramente menores no caso HEII, explicável pela pequena diferença entre os dois valores de condutância térmica superficial.

Representada na figura 24, a humidade relativa do reboco exterior apresenta, tal como na simulação HEI, uma evolução muito variável, no entanto, com valores mais baixos. O valor mínimo atingido na simulação HEI é de 58.5%, enquanto que na simulação HEII é de 37.8%, resultado de um maior fluxo de calor no reboco exterior. As restantes camadas têm comportamento de HR idêntico nas duas simulações.

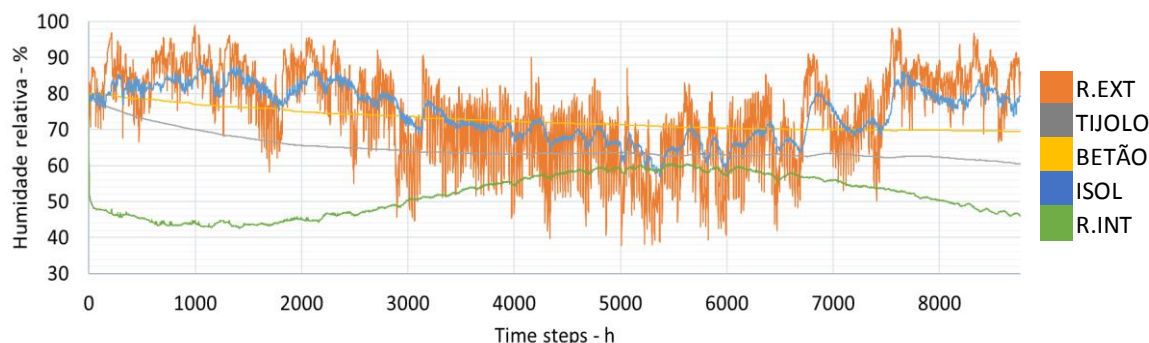


Figura 24- Evolução da humidade relativa para a simulação HEII

Os valores de temperatura registados nos pontos 1 a 8, para as simulações HEI e HEII, apresentam a mesma distribuição e, aproximadamente, o mesmo valor médio, máximo e mínimo, concluindo que este parâmetro não influencia as temperaturas atingidas na camada interior do elemento. Nos pontos 9 a 23, a amplitude de temperaturas atingidas aumenta. Observa-se nestes pontos, que as temperaturas médias e máximas são mais baixas na simulação HEII, onde a condutância térmica superficial é maior e por isso, o fluxo de calor na superfície também é maior, levando neste caso, a maiores perdas de calor. Como se pode observar na figura 25, que representa as temperaturas no par de pontos diametralmente opostos 4 e 23, a alteração deste parâmetro térmico tem efeitos mais prevalentes, embora pequenos, no exterior do elemento construtivo.

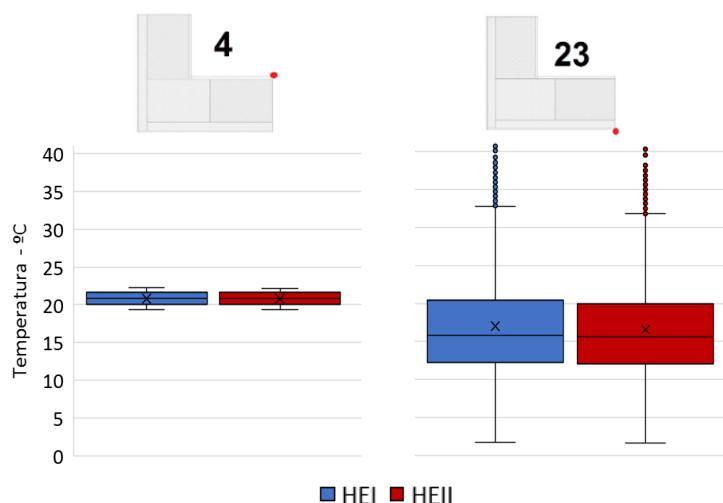


Figura 25 -Temperaturas dos pontos 4 e 23

O aumento da condutância térmica superficial provoca nos resultados de HR uma maior perturbação nos pontos exteriores do elemento construtivo. Os resultados de HR para os 23 pontos são ligeiramente maiores na simulação HEII, onde o fluxo de calor na superfície exterior é maior. A figura 26 representa os resultados de humidade relativa no par de pontos 4 e 23, traduzindo precisamente isto.

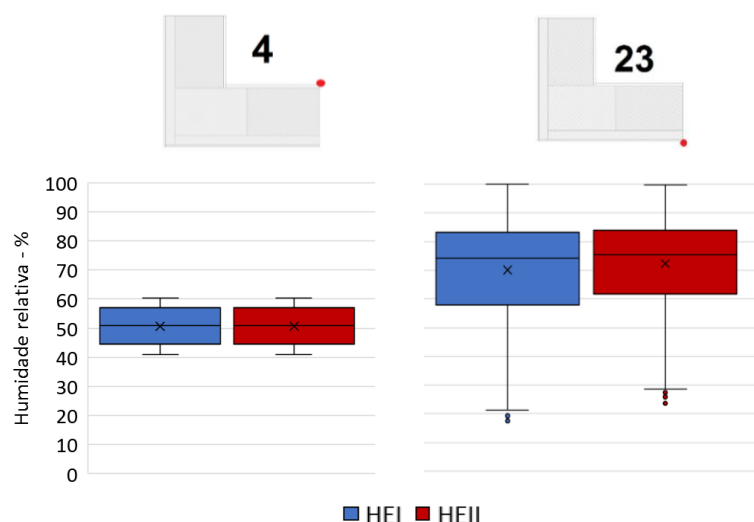


Figura 26- Humidade relativa dos pontos 4 e 23

Em suma, as diferenças relativas médias dos resultados de temperatura e de humidade relativa nos 23 pontos, relativamente à simulação base (HEI) estão quantificadas no quadro 7.

Quadro 7 -Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em HEII

Pontos		Temperatura	Humidade relativa	
		HEI	HEII	HEII
Reboco interior	1	↓ -0.1%	↑	0.1%
	2	↓ -0.5%	↑	0.6%
	3	↓ -0.2%	↑	0.3%
	4	↓ -0.1%	↑	0.1%
	5	↓ -0.2%	↑	0.1%
	6	↓ -0.3%	↑	0.3%
	7	↓ -0.7%	↑	0.6%
	8	↓ -0.1%	↑	0.1%
Reboco exterior	9	↓ -0.9%	↑	0.6%
	10	↓ -1.0%	↑	0.5%
	11	↓ -1.1%	↑	0.4%
	12	↓ -1.2%	↑	0.3%
	13	↓ -1.4%	↑	0.5%
	14	↓ -2.2%	↑	1.6%
	15	↓ -2.2%	↑	1.5%
	16	↓ -1.7%	↑	1.3%
	17	↓ -1.6%	↑	1.0%
	18	↓ -1.5%	↑	1.1%
	19	↓ -1.5%	↑	1.5%
	20	↓ -1.6%	↑	1.5%
	21	↓ -1.7%	↑	1.9%
	22	↓ -2.3%	↑	2.6%
	23	↓ -2.2%	↑	2.6%

3.3.3. VARIAÇÃO DA FRAÇÃO DE CHUVA INCIDENTE

A simulação RII corresponde ao caso base, onde a fração de chuva incidente é de 70%. A simulação RI produz resultados para uma incidência de chuva nula, de 0%. As diferentes camadas apresentam, para RI e RII, comportamento de temperatura idêntico, atingindo os mesmos valores máximos e mínimos durante o ano de simulação. Foram comparadas as evoluções da HR nas diferentes camadas, em RI e RII, para um período de uma semana no inverno (figura 27a e 27b) e uma semana no verão (figura 28a e 28b).

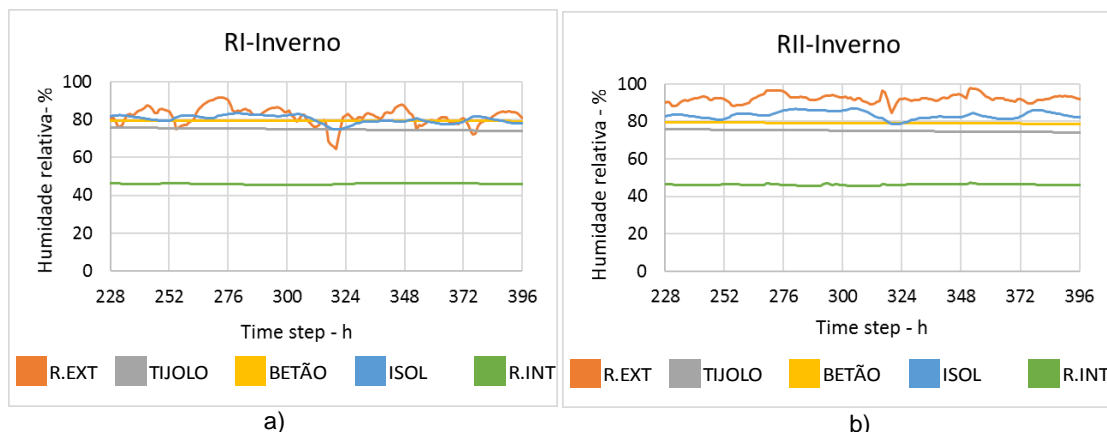


Figura 27- Humidades relativas observadas no Inverno: a) na simulação RI; b) na simulação RII

Na semana de inverno (figura 27), observa-se que o reboco exterior apresenta valores superiores na simulação RII, sendo a camada com maior HR. Isto verifica-se para o resto do ano também. As restantes camadas apresentam os mesmos resultados de HR para ambas as simulações, com se pode observar na figura 27, mostrando-se insensíveis à variação da fração de chuva incidente.

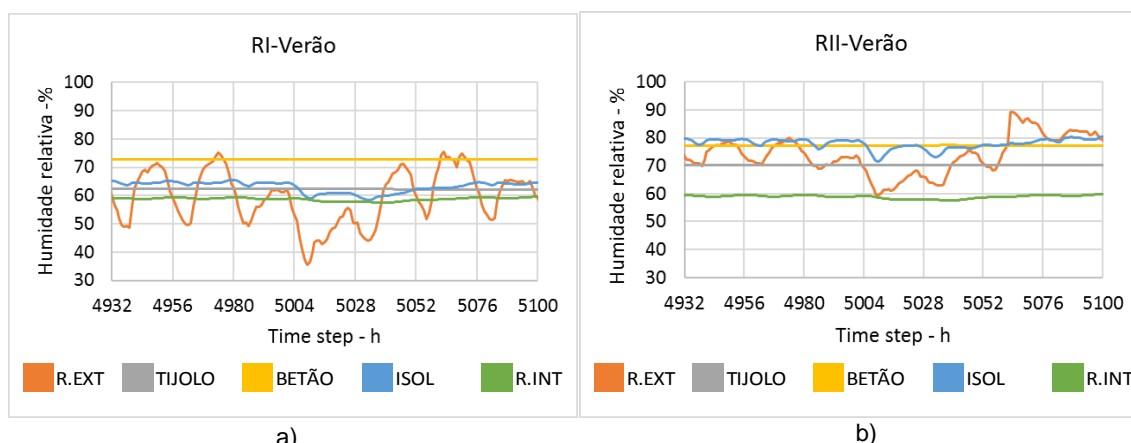


Figura 28-Humidades relativas observadas no Verão: a) na simulação RI; b) simulação RII

Na semana de verão (figura 28), o reboco exterior apresenta valores de HR maiores no caso RII; Entre a simulação RI e RII, a HR mínima atingida aumenta cerca de 20%. O pilar de betão, tijolo e isolamento, apresentam valores de HR mais elevados no caso RII, onde a fração de chuva incidente é maior.

Os pontos 1 a 8 do elemento construtivo, pertencentes ao reboco interior apresentam valores de HR idênticos para as simulações RI e RII, com exceção do ponto 7 cujos resultados da simulação RII são ligeiramente maiores que os de RI. Nos pontos 9 a 23, observa-se o mesmo que no ponto 7, ou seja, a HR é superior na simulação RII devido à incidência de chuva ser maior. As temperaturas nos 23 pontos, para ambas as simulações, apresentam a valores semelhantes, ou seja, a condutibilidade térmica dos materiais não foi alterada pelo ligeiro aumento da humidade. A figura 29 indica um ponto interior do cunhal, demonstrando a inalteração dos resultados de T e de HR nos pontos interiores do elemento construtivo, face à alteração da fração de chuva incidente.

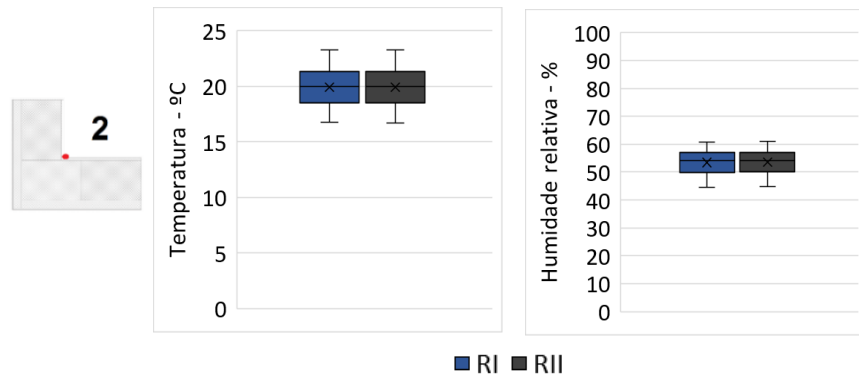


Figura 29 -Temperatura e humidade relativa do ponto 2

A quantidade de chuva recebida pelas superfícies exteriores varia consoante a orientação das mesmas. Neste sentido, a figura 30 indica a HR e T dos pontos 19, 21 e 23 pertencentes a faces de orientação diferente. Observa-se uma pequena influência da orientação na quantidade de chuva a que a superfície é exposta, sendo apenas parte desta, incidida na superfície, definida pela fração de chuva incidente.

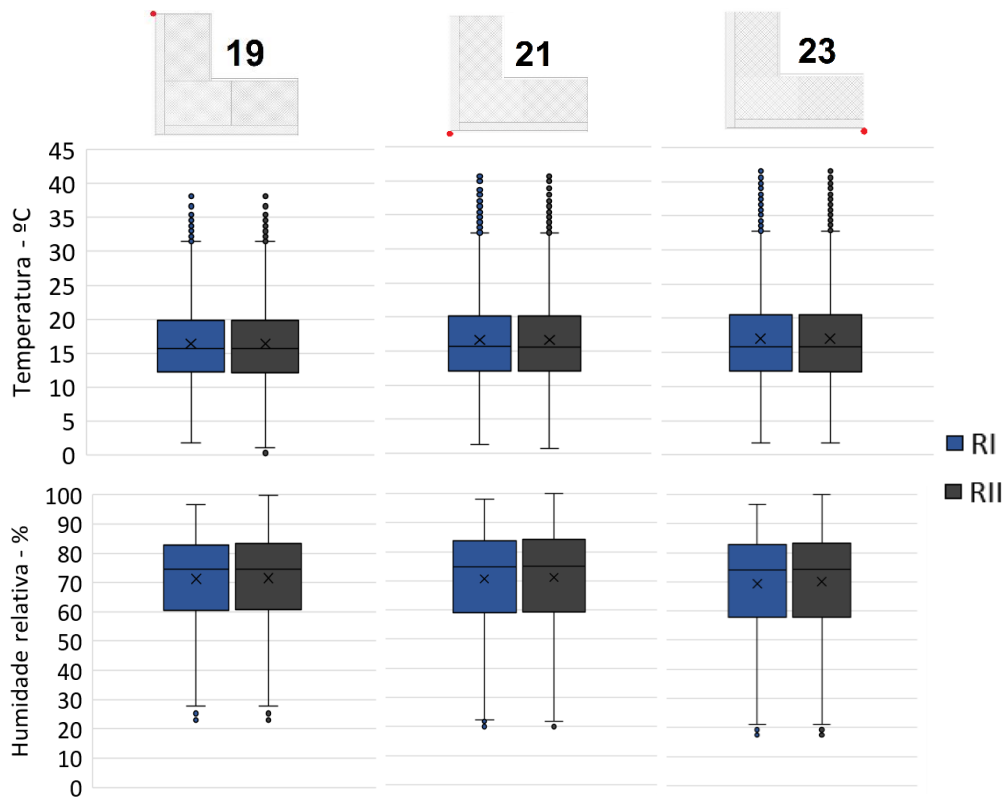


Figura 30- Temperaturas e humidades relativas dos pontos 19,21 e 23

O quadro 8 indica as diferenças relativas médias dos resultados de temperatura e de humidade relativa nos 23 pontos, relativamente à simulação base (RII), apoiando as conclusões destas simulações.

Quadro 8 – Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em RII

Pontos		Temperatura	Humidade relativa
		RI	RI
Reboco interior	1 →	0.0%	→ 0.0%
	2 ↑	0.1%	↓ -0.2%
	3 →	0.0%	↓ -0.1%
	4 →	0.0%	→ 0.0%
	5 →	0.0%	↓ -0.2%
	6 →	0.0%	↓ -0.5%
	7 ↑	0.1%	↓ -1.3%
	8 →	0.0%	↓ -0.1%
	9 ↑	0.1%	↓ -1.6%
	10 ↑	0.1%	↓ -1.9%
	11 ↑	0.1%	↓ -3.1%
	12 ↑	0.1%	↓ -3.4%
	13 ↑	0.1%	↓ -3.9%
Reboco exterior	14 ↑	0.3%	↓ -4.4%
	15 ↑	0.3%	↓ -4.4%
	16 ↑	0.3%	↓ -3.4%
	17 ↑	0.2%	↓ -2.1%
	18 ↑	0.2%	↓ -1.8%
	19 ↑	0.3%	↓ -0.4%
	20 ↑	0.3%	↓ -0.4%
	21 ↑	0.3%	↓ -0.6%
	22 ↑	0.4%	↓ -0.7%
	23 ↑	0.4%	↓ -0.7%

3.3.4. VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SOLAR

A alteração deste coeficiente superficial, α , traduz-se em duas novas simulações: AI para um coeficiente de absorção de 0.5 e AII para um coeficiente de absorção de 0.8. A simulação AIII corresponde ao caso base, com um coeficiente de 0.2.

As temperaturas médias atingidas na superfície exterior do elemento construtivo sofrem um aumento com o aumento do α . Este efeito é perceptível nos dois dias mais quentes do verão (quando é maior a radiação solar incidente), representados na figura 31, em que as temperaturas máximas atingidas no reboco exterior são, no caso AIII, 40°C, no caso AI, 46.5°C e no caso AII, 53°C. Todas as camadas excepto o reboco interior mostram-se afetadas pelo aumento do coeficiente de absorção, embora o seu efeito seja maior no reboco exterior e isolamento térmico.

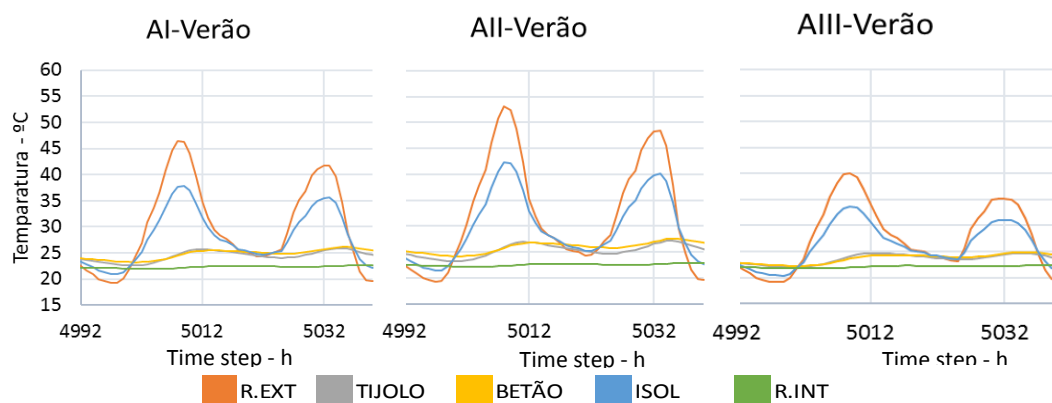


Figura 31 - Evolução da temperatura das diferentes camadas nas simulações AI, AII, e AIII, nos dois dias mais quentes do verão

A figura 32 representa os resultados de humidade relativa nas diferentes camadas para as três simulações, durante os dois dias mais quentes do verão. Observa-se que estes diminuem com o aumento do coeficiente de absorção. A HR mínima atingida no reboco exterior é de 59% para o α mais baixo e de 20% para o α mais alto: ocorre uma maior secagem do reboco exterior, provocado por uma maior quantidade de radiação solar absorvida devido ao aumento do α .

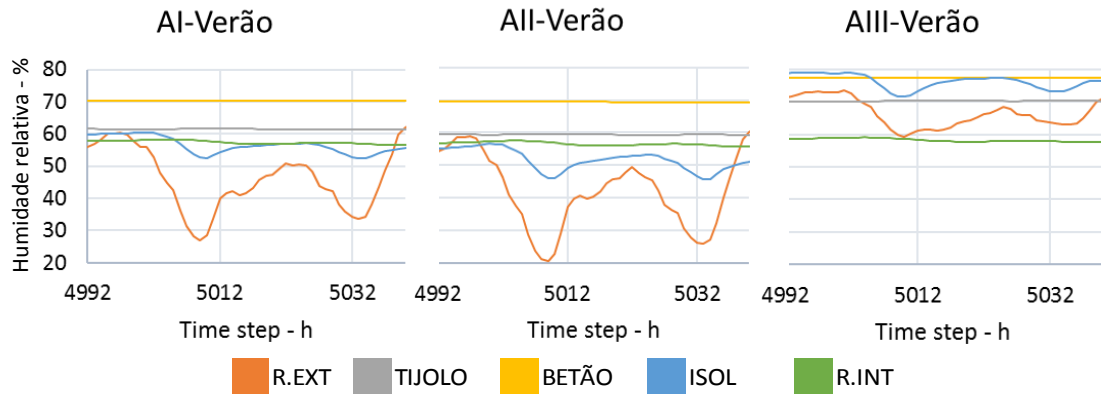


Figura 32 - Evolução da HR das diferentes camadas nas simulações AI, AII, e AIII, nos dois dias mais quentes do verão

O registo das temperaturas e humidades relativas nos 23 pontos aponta para a mesma conclusão: quanto maior o α , maior é a temperatura e menor é a humidade relativa em todo o elemento. Nos pontos 1 a 8 (reboco interior), com exceção do ponto 7, o efeito da alteração do α é pouco acentuado enquanto que nos restantes pontos, o efeito é muito mais acentuado. A figura 33 representa as temperaturas atingidas em 3 pontos do reboco interior do elemento construtivo onde se verifica uma menor influência do α .

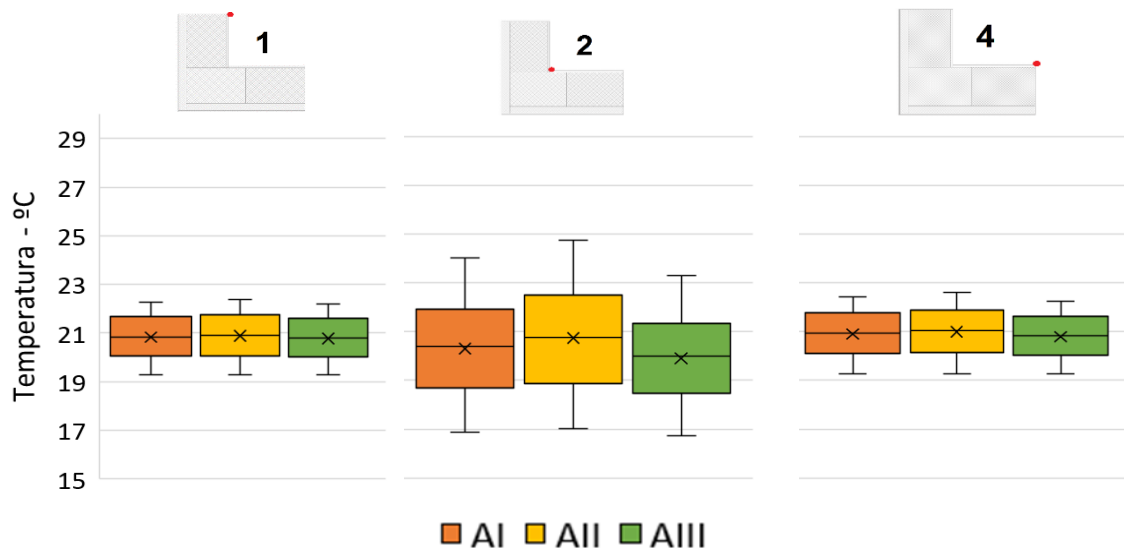


Figura 33- Temperaturas dos pontos 1,2 e 4

Como foi referido, os pontos interiores apresentam menos sensibilidade à alteração do α , no entanto, observa-se no ponto 2 uma maior amplitude de temperaturas atingidas, tal como maiores diferenças de temperatura entre as simulações AI, AII e AIII. A figura 34 representa os resultados de temperatura para 3 pontos exteriores diametralmente opostos aos anteriores.

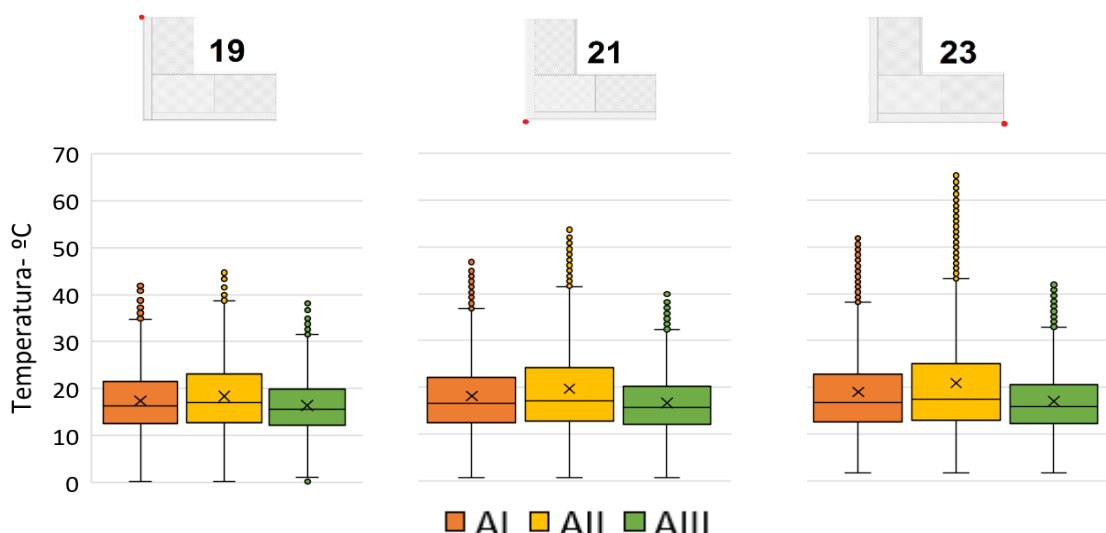


Figura 34 Temperaturas dos pontos 19, 21 e 23

O quadro 9 indica as diferenças relativas médias dos resultados de temperatura e de humidade relativa nos 23 pontos, relativamente à simulação base (AIII), onde se confirmam as conclusões anteriores.

Quadro 9 – Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em AI e AII

Pontos		Temperatura		Humidade relativa	
		AI	AII	AI	AII
Reboco interior	1	↑ 0.3%	↑ 0.5%	↓ -0.3%	↓ -0.7%
	2	↑ 2.0%	↑ 4.1%	↓ -2.4%	↓ -4.8%
	3	↑ 0.9%	↑ 1.8%	↓ -1.1%	↓ -2.3%
	4	↑ 0.5%	↑ 0.9%	↓ -0.6%	↓ -1.1%
	5	↑ 0.7%	↑ 1.4%	↓ -0.6%	↓ -1.2%
	6	↑ 1.3%	↑ 2.7%	↓ -1.3%	↓ -2.5%
	7	↑ 3.1%	↑ 6.3%	↓ -2.4%	↓ -4.8%
	8	↑ 0.4%	↑ 0.8%	↓ -0.4%	↓ -0.7%
	9	↑ 3.5%	↑ 7.0%	↓ -1.8%	↓ -3.6%
	10	↑ 4.1%	↑ 8.2%	↓ -1.8%	↓ -3.6%
	11	↑ 4.9%	↑ 9.9%	↓ -2.0%	↓ -4.2%
	12	↑ 5.5%	↑ 11.0%	↓ -2.0%	↓ -4.6%
	13	↑ 6.3%	↑ 12.7%	↓ -3.0%	↓ -6.7%
Reboco exterior	14	↑ 9.0%	↑ 18.1%	↓ -7.6%	↓ -14.7%
	15	↑ 8.9%	↑ 17.9%	↓ -7.3%	↓ -14.0%
	16	↑ 7.6%	↑ 15.3%	↓ -6.0%	↓ -11.6%
	17	↑ 5.6%	↑ 11.2%	↓ -3.4%	↓ -6.6%
	18	↑ 5.5%	↑ 11.0%	↓ -4.0%	↓ -7.7%
	19	↑ 5.6%	↑ 11.2%	↓ -5.7%	↓ -10.6%
	20	↑ 5.6%	↑ 11.3%	↓ -5.8%	↓ -10.6%
	21	↑ 7.6%	↑ 15.3%	↓ -8.0%	↓ -14.1%
	22	↑ 9.0%	↑ 18.1%	↓ -9.6%	↓ -16.3%
	23	↑ 9.1%	↑ 18.2%	↓ -9.6%	↓ -16.3%

3.3.5. VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE

A variação deste coeficiente da superfície exterior foi analisada através da simulação de dois casos: EI, que representa uma emissividade alta e EII, correspondente a uma emissividade baixa. A emissividade da superfície define a capacidade de esta emitir calor por radiação, sendo que quanto maior é a

emissividade, maior é a quantidade de energia emitida pela superfície e maior são as perdas de calor. Foi analisada a evolução da T (figura 35) e HR (figura 36) nos dois dias mais quentes do verão.

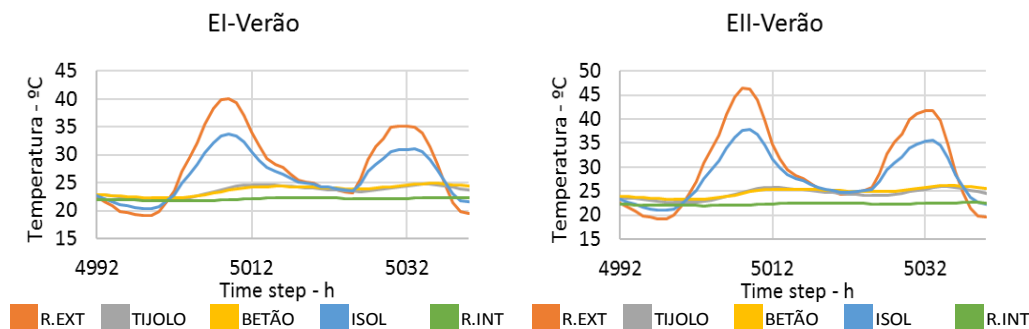


Figura 35- Temperaturas registadas no Verão na simulação EI (esquerda) e simulação EII (direita)

Na figura 35, observa-se que o reboco exterior apresenta maiores temperaturas para uma emissividade mais baixa e que o isolamento é também afetado de forma idêntica. Por outro lado, o pilar de betão, pano de alvenaria e reboco interior não são sensíveis à alteração da emissividade. Na figura 36 verifica-se que, com a redução da emissividade, a humidade relativa das camadas apresenta valores mais baixos, sendo este efeito mais evidente no reboco exterior que no isolamento térmico.

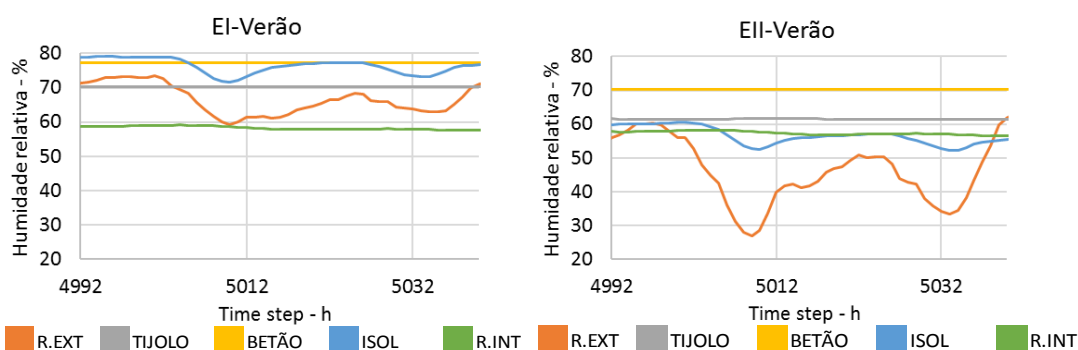


Figura 36- Humidades relativas registadas no Verão na simulação EI (esquerda) e simulação EII (direita)

Em todos os 23 pontos, os resultados apresentam a mesma distribuição: uma emissividade alta (EI) conduz a temperaturas mais baixas, enquanto que uma emissividade baixa (EII) origina temperaturas mais altas, evidente em todo o elemento construtivo. Os pontos 14 a 23, do reboco exterior, apresentam bastantes valores atípicos de temperatura. A figura 37 indica as temperaturas atingidas em 3 pontos da superfície interior do elemento construtivo e a figura 38, as temperaturas correspondentes aos da figura 37, mas situados no exterior.

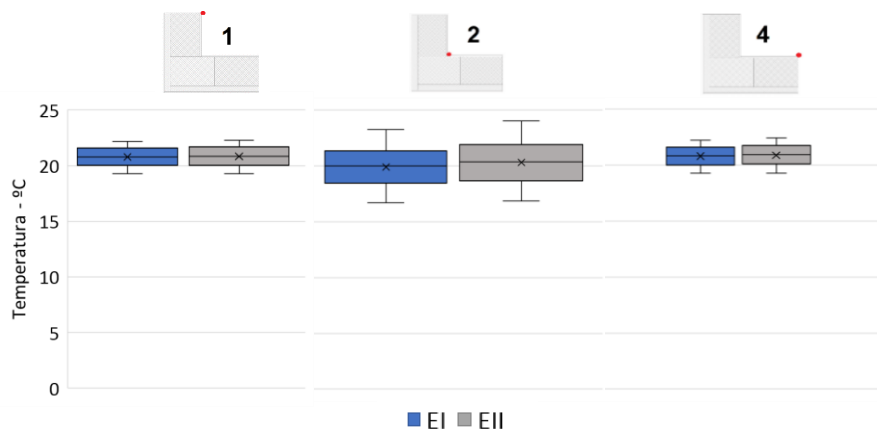


Figura 37 - Temperaturas dos pontos 1, 2 e 4

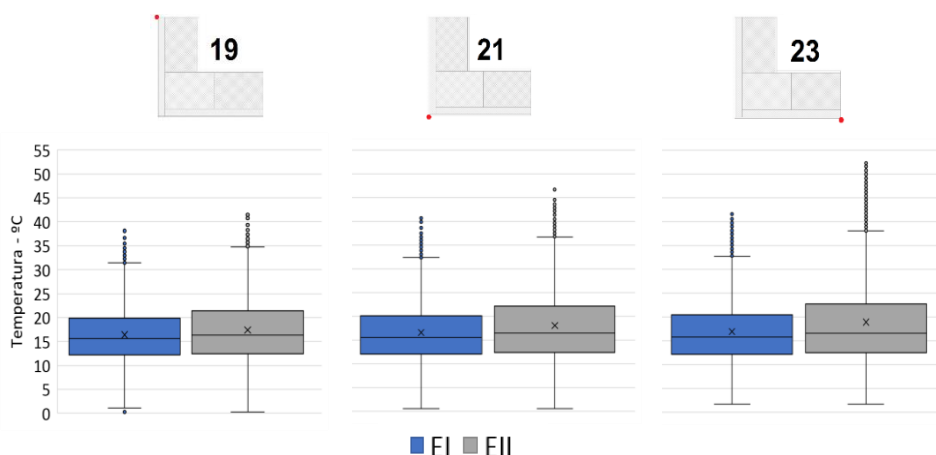


Figura 38 - Temperaturas dos pontos 19, 21 e 23

As diferenças relativas médias dos resultados de temperatura e de humidade relativa nos 23 pontos, relativamente à simulação base (EI) estão quantificadas no quadro 10.

Quadro 10 - Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em EII

Pontos		Temperatura	Humidade relativa
		EII	EII
Reboco interior	1	↑ 0.3%	↓ -0.3%
	2	↑ 2.0%	↓ -2.4%
	3	↑ 0.9%	↓ -1.1%
	4	↑ 0.5%	↓ -0.6%
	5	↑ 0.7%	↓ -0.6%
	6	↑ 1.3%	↓ -1.3%
	7	↑ 3.1%	↓ -2.4%
	8	↑ 0.4%	↓ -0.4%
	9	↑ 3.5%	↓ -1.8%
	10	↑ 4.1%	↓ -1.8%
	11	↑ 4.9%	↓ -2.0%
	12	↑ 5.5%	↓ -2.0%
	13	↑ 6.3%	↓ -3.0%
Reboco exterior	14	↑ 9.0%	↓ -7.6%
	15	↑ 8.9%	↓ -7.3%
	16	↑ 7.6%	↓ -6.0%
	17	↑ 5.6%	↓ -3.4%
	18	↑ 5.5%	↓ -4.0%
	19	↑ 5.6%	↓ -5.7%
	20	↑ 5.6%	↓ -5.8%
	21	↑ 7.6%	↓ -8.0%
	22	↑ 9.0%	↓ -9.7%
	23	↑ 9.1%	↓ -9.6%

3.3.6. ALTERAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DO ELEMENTO

A quantidade de calor recebido pelas superfícies exteriores do elemento varia consoante a orientação do mesmo, como foi explicado no §3.2.3. No caso base (simulação OI), uma face exterior do elemento construtivo está orientada para Norte e a outra para Oeste. Em cada simulação posterior, o elemento construtivo é rodado 90°, ou seja, a primeira e segunda face passam a estar orientadas para Este e Norte (OII), Sul e Este (OIII), e Oeste e Sul (OIV), respetivamente.

Os resultados de temperatura, para as quatro simulações, são bastante semelhantes (figura 39). Isto é causado pelo coeficiente de absorção baixo ($\alpha=0.2$) das superfícies exteriores, conduzindo a uma quantidade reduzida de radiação solar absorvida. Por isso, embora a quantidade de radiação recebida varie com a orientação, esta não será suficiente para que as diferenças causadas sejam muito evidentes.

Nos pontos 1 a 14, correspondentes à totalidade do elemento construtivo com exceção do reboco exterior, a temperatura não varia com a orientação do elemento construtivo, apresentando valores da mesma ordem de grandeza para as diferentes simulações.

Nos restantes pontos 15 a 23, correspondentes ao reboco exterior, as diferenças provocadas na temperatura pela mudança de orientação, embora pequenas, são mais evidentes. Por exemplo, o ponto 20 inicialmente orientado a Norte na simulação OI, apresenta valor médio de 16.4°C e para as simulações OII, OIII e OIV: 17°C, 17.3°C e 17°C (figura 39). A figura 39 indica os resultados de temperatura nos pontos 20, 21 e 22.

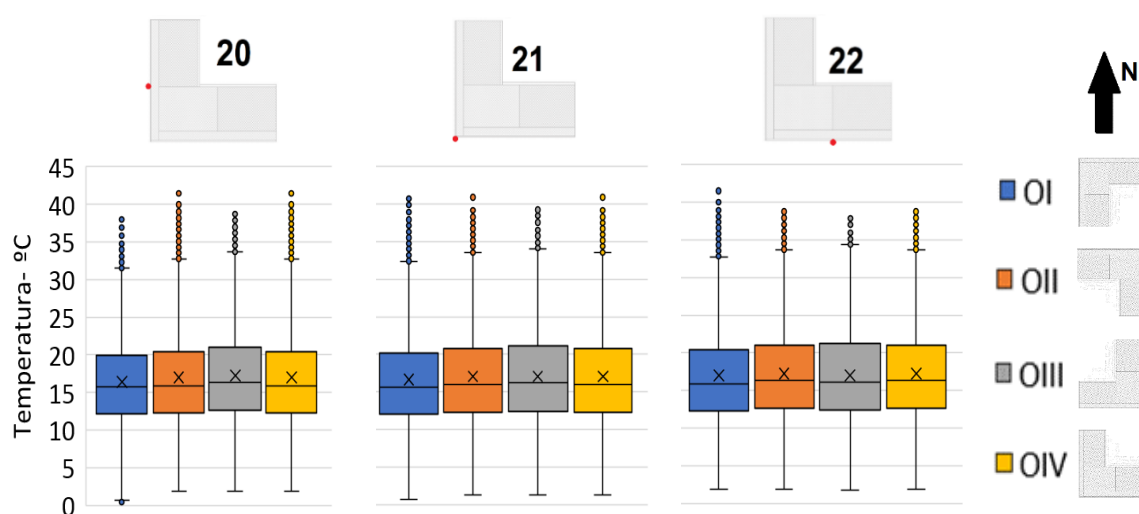


Figura 39- Temperaturas nos pontos 20, 21 e 22

Conclui-se a partir da figura 39 que:

- As temperaturas mais baixas são obtidas na simulação OI, em que o elemento está orientado para Norte, recebendo menos radiação solar;
- As simulações OII e OIV, em que o elemento construtivo está orientado para Este e Oeste, respetivamente, resultam na mesma distribuição de temperaturas, apresentando temperaturas médias e máximas maiores que em OI. Esta igualdade de temperaturas entre OII e OIV, deve-se à quantidade de radiação recebida de Este ser semelhante à recebida de Oeste, como se pode verificar na figura 15;
- Na simulação OIII, em que o elemento construtivo está orientado para Sul, verificam-se as maiores temperaturas, pois é do Sul que provém maior quantidade de radiação solar (figura 15).

Quanto à humidade relativa, os pontos 1 a 8, correspondentes ao reboco interior, apresentam os mesmos resultados para as quatro simulações. Os restantes pontos 9 a 23 apresentam resultados de humidade relativa que variam com a orientação, como se pode observar na figura 40, que indica as humidades relativas nos pontos 20, 21 e 22.

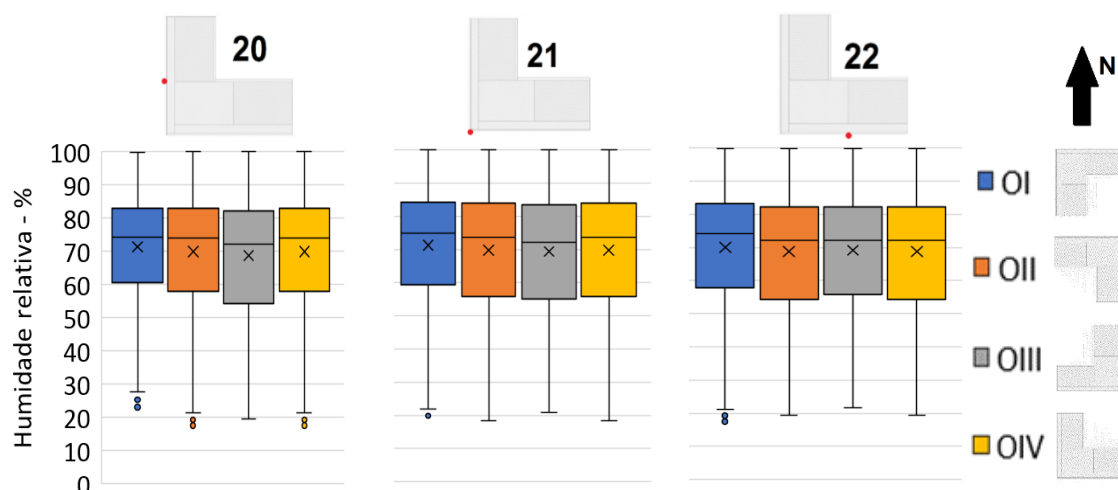


Figura 40 – Humidade relativa nos pontos 20, 21 e 22

Constata-se na figura 40 que:

- A simulação OI, onde o elemento construtivo está orientado para Norte, resulta nas maiores humidades relativas, pelo que a pouca radiação incidente dificulta a secagem do elemento construtivo;
- As simulações OII e OIV resultam na mesma distribuição de humidades relativas, tal como se observou para as temperaturas, provocado pela semelhante quantidade de radiação recebida nas duas simulações, que garante condições de secagem semelhante;
- Os menores valores de humidade relativa são resultado da maior incidência de radiação solar, quando o elemento construtivo está orientado para Sul.

O quadro 11 quantifica as diferenças relativas médias dos resultados de temperatura e de humidade relativa nos 23 pontos, relativamente à simulação base (OI).

Quadro 11 - Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em OII, OIII, OIV

Pontos		Temperatura			Humidade relativa		
		OII	OIII	OIV	OII	OIII	OIV
Reboco interior	1	↑ 0.1%	↑ 0.2%	↑ 0.1%	↓ -0.2%	↓ -0.2%	↓ -0.2%
	2	↑ 0.5%	↑ 0.5%	↑ 0.5%	↓ -0.6%	↓ -0.5%	↓ -0.6%
	3	↑ 0.2%	↑ 0.2%	↑ 0.2%	↓ -0.3%	↓ -0.2%	↓ -0.3%
	4	↑ 0.1%	→ 0.0%	↑ 0.1%	↓ -0.1%	→ 0.0%	↓ -0.1%
	5	↑ 0.1%	→ 0.0%	↑ 0.1%	→ 0.0%	↓ -0.1%	→ 0.0%
	6	↑ 0.3%	↑ 0.2%	↑ 0.3%	↓ -0.3%	↓ -0.4%	↓ -0.3%
	7	↑ 0.8%	↑ 0.7%	↑ 0.8%	↓ -0.4%	↓ -0.5%	↓ -0.4%
	8	↑ 0.2%	↑ 0.3%	↑ 0.2%	↓ -0.1%	↓ -0.1%	↓ -0.1%
	9	↑ 2.0%	↑ 3.0%	↑ 2.0%	↑ 1.8%	↑ 1.9%	↑ 1.8%
	10	↑ 1.4%	↑ 1.6%	↑ 1.4%	↑ 2.3%	↑ 2.3%	↑ 2.3%
	11	↑ 1.5%	↑ 1.4%	↑ 1.5%	↑ 1.3%	↓ -0.4%	↑ 1.3%
	12	↑ 1.1%	↑ 0.5%	↑ 1.1%	↑ 0.2%	↓ -3.0%	↑ 0.2%
	13	↑ 1.1%	↑ 0.1%	↑ 1.1%	↑ 0.3%	↓ -3.0%	↑ 0.3%
	14	↑ 2.7%	↑ 1.6%	↑ 2.7%	↓ -0.1%	↓ -2.8%	↓ -0.1%
Reboco exterior	15	↑ 2.7%	↑ 1.6%	↑ 2.7%	→ 0.0%	↓ -2.5%	→ 0.0%
	16	↑ 2.8%	↑ 3.5%	↑ 2.8%	↓ -0.1%	↓ -1.4%	↓ -0.1%
	17	↑ 2.8%	↑ 5.2%	↑ 2.8%	↑ 0.3%	↓ -0.5%	↑ 0.3%
	18	↑ 2.9%	↑ 5.4%	↑ 2.9%	↑ 0.4%	↓ -0.1%	↑ 0.4%
	19	↑ 3.0%	↑ 5.6%	↑ 3.0%	↓ -2.9%	↓ -4.3%	↓ -2.9%
	20	↑ 2.9%	↑ 5.5%	↑ 2.9%	↓ -2.8%	↓ -4.2%	↓ -2.8%
	21	↑ 2.8%	↑ 3.6%	↑ 2.8%	↓ -2.5%	↓ -2.3%	↓ -2.5%
	22	↑ 2.9%	↑ 1.7%	↑ 2.9%	↓ -0.9%	↑ 0.7%	↓ -0.9%
	23	↑ 2.9%	↑ 1.7%	↑ 2.9%	↓ -0.9%	↑ 0.8%	↓ -0.9%

3.3.7. ADIÇÃO DE UMA FONTE DE HUMIDADE

A simulação MSI corresponde ao caso base e a MSII corresponde a uma fonte de humidade de 0.0012kg/s.m. Relativamente aos resultados de temperatura das duas simulações, estes apresentam semelhante comportamento nas diferentes camadas embora com grandezas de valor diferentes, exemplificado com a evolução da temperatura durante dois dias de Inverno, representada na figura 41.

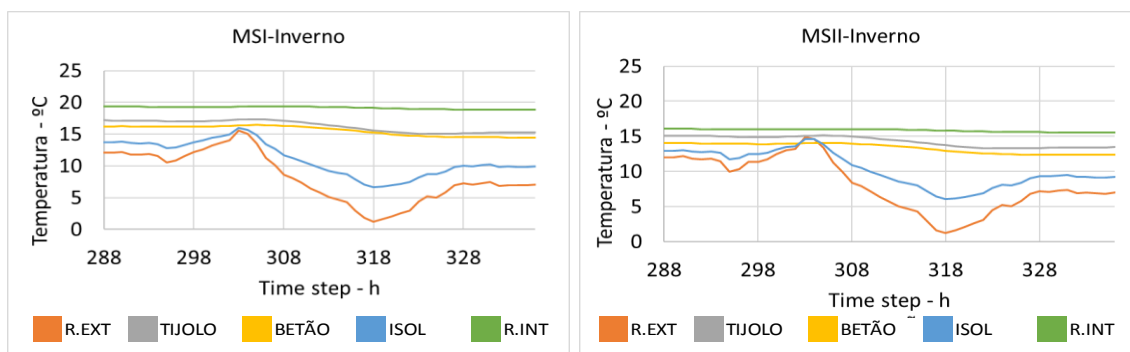


Figura 41- Evolução da temperatura para dois dias de inverno na simulação MSI (esquerda) e MSII (direita)

Observa-se na figura 41 que o reboco exterior e isolamento (camadas mais afastadas da fonte de humidade) não têm a sua temperatura influenciada pela fonte de humidade, no entanto, o reboco interior, betão e tijolo apresentam temperaturas mais baixas na simulação MSII, em que existe a fonte de humidade no canto.

Quanto à humidade relativa, as camadas apresentam valores maiores no caso MSII, como seria de esperar. A figura 42 representa a evolução da humidade relativa durante um ano. Verifica-se que o pilar de betão e o tijolo tendem a ficar saturados, com humidades relativas de 100%, o que não acontece na simulação MSI (figura 18). O reboco exterior, por outro lado, não sofre alteração aparente com a adição da fonte de humidade. Por fim, o reboco interior apresenta maiores valores de humidade relativa em MSII, no entanto, por se encontrar exposto ao clima interior e, por isso, com maior facilidade de secagem, não atinge os 100% de humidade relativa como ocorre no tijolo e betão.

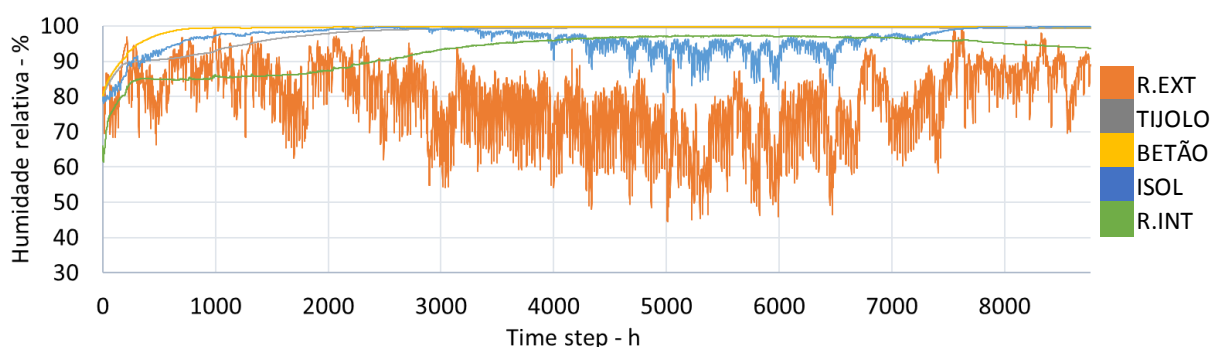


Figura 42- Evolução da humidade relativa na simulação MSII

Relativamente aos valores de temperatura medidos nos 23 pontos, estes apresentam semelhante distribuição nos pontos 1 a 13 (reboco interior, tijolo e betão): os valores de temperatura são inferiores na simulação MSII. Nos pontos 14 a 23, o efeito do isolamento térmico e a maior exposição ao clima exterior fazem-se sentir, com os pontos a apresentarem valores de temperatura semelhantes para as duas simulações (figura 43).

Os valores de humidade relativa apresentam a mesma distribuição para os primeiros 18 pontos (reboco interior, tijolo, betão, isolamento), com os valores da simulação MSII bastante mais elevados que os obtidos na simulação MSI. Os pontos 18 a 23, correspondentes à superfície exterior, como anteriormente concluído, apresentam os mesmos valores e distribuição para as duas simulações. Como exemplo, a

figura 43 indica os resultados de humidade relativa e de temperatura no ponto onde a fonte de humidade é aplicada (ponto 2) e em 2 pontos diametralmente opostos.

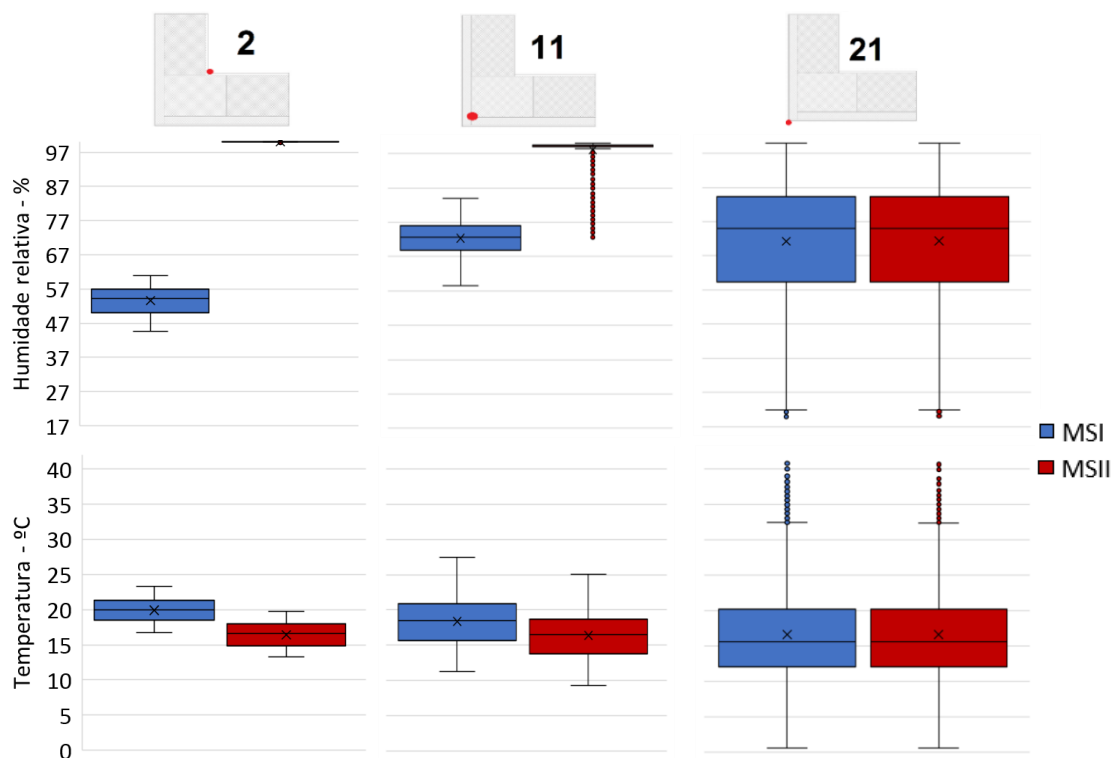


Figura 43 -Temperaturas e humidades relativas dos pontos 2, 11 e 21

O quadro seguinte indica as diferenças relativas médias dos resultados de temperatura e humidade relativa dos 23 pontos, relativamente à simulação base (MSI).

Quadro 12- Diferenças relativas médias dos resultados de T e HR em MSII

Pontos		Temperatura	Humidade relativa
		MSII	MSII
Reboco interior	1	↓ -20.6%	↑ 97.5%
	2	↓ -17.5%	↑ 87.7%
	3	↓ -19.4%	↑ 94.5%
	4	↓ -7.3%	↑ 26.1%
	5	↓ -8.1%	↑ 65.5%
	6	↓ -18.4%	↑ 86.0%
	7	↓ -15.0%	↑ 65.2%
	8	↓ -20.2%	↑ 93.2%
	9	↓ -10.0%	↑ 42.1%
	10	↓ -12.1%	↑ 41.9%
	11	↓ -11.0%	↑ 36.0%
	12	↓ -10.7%	↑ 36.3%
	13	↓ -5.5%	↑ 34.3%
Reboco exterior	14	↓ -0.3%	↑ 19.6%
	15	↓ -1.0%	↑ 17.8%
	16	↓ -0.1%	↑ 13.2%
	17	↓ -1.2%	↑ 20.8%
	18	↓ -0.8%	↑ 21.2%
	19	↓ -0.3%	↑ 0.7%
	20	↓ -0.5%	↑ 0.9%
	21	↓ -0.1%	↑ 0.1%
	22	↓ -0.5%	↑ 0.8%
	23	↓ -0.2%	↑ 0.5%

3.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A extração dos resultados de temperatura e de humidade relativa para as duas superfícies interiores (reboco interior) e para as duas superfícies exteriores (reboco exterior) permite uma melhor comparação e análise das alterações causadas pela variação dos diferentes parâmetros. Para cada superfície são representados os resultados de temperatura, de humidade relativa e as suas diferenças relativas face ao caso base. A figura 44 representa as temperaturas atingidas numa das camadas de reboco interior do elemento construtivo.

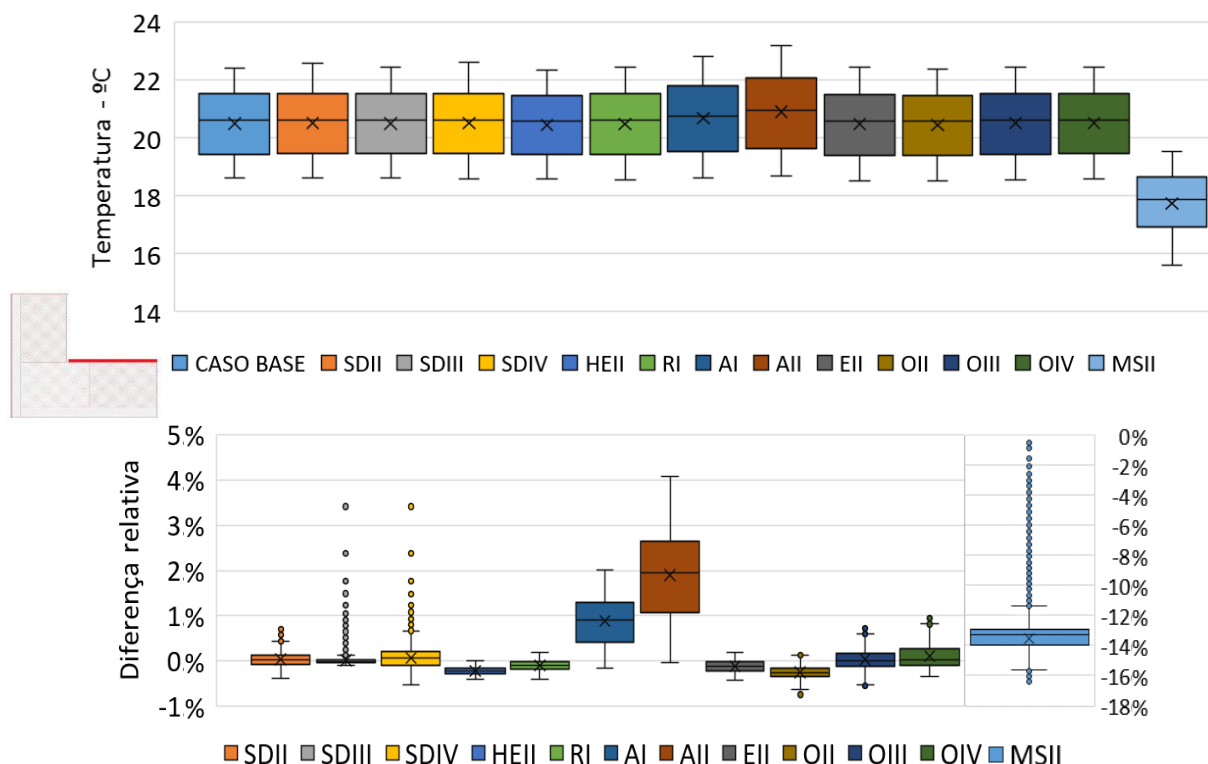


Figura 44-Temperaturas e suas diferenças relativas na primeira camada de reboco interior

Observa-se na figura 44, que os resultados de temperatura são semelhantes para a maioria das simulações correspondentes à alteração de parâmetros relacionados com a superfície exterior. Destas simulações, destacam-se as AI e AII, correspondentes ao aumento do coeficiente de absorção da superfície exterior para 0.5 e 0.8, respetivamente. Estes aumentos conduzem a temperaturas, em média, 2% superiores no caso AII e 1% superiores no caso AI, uma vez que há um aumento na quantidade de calor absorvido e transmitido para o interior.

A simulação MSII resulta nas temperaturas mais baixas do reboco interior: a fonte de humidade no canto interior provoca um decréscimo médio na temperatura em cerca de 13% (figura 44). O decréscimo da temperatura devido à fonte de humidade está relacionado com o aumento da condutibilidade térmica com o teor de humidade (a figura 45 ilustra o caso do reboco) por isso, quanto maior o teor de humidade, maior é a sua condutibilidade térmica que conduz a um maior o fluxo de calor, provocando um decréscimo de temperatura.

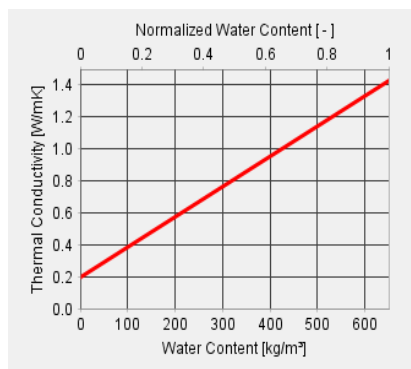


Figura 45- Variação da condutância térmica do reboco interior com o teor de humidade

A figura 46 representa os resultados de temperatura para a segunda camada de reboco interior. Observa-se que o comportamento desta camada de reboco é praticamente igual à primeira. No entanto, verifica-se que no caso da fonte de humidade, esta provoca, em média, uma descida de temperaturas maior, que é de 20% (figura 46).

A fonte de humidade localiza-se na segunda camada de reboco, sendo de esperar que esta apresente valores de humidade relativa média superiores e por isso, temperaturas mais baixas. A diminuição da temperatura provocada pela fonte de humidade nesta camada de reboco é agravada pela ponte térmica, representada pelo ponto 7 (figura 11). Este ponto pertence à fronteira desta camada e apresenta, em todas as simulações efetuadas, resultados de temperatura e humidade relativa críticos.

Entre as duas camadas de reboco, existe uma interface, visto que a representação do reboco interior no programa corresponde a dois retângulos perpendiculares (figura 10). Assim, a passagem de água da segunda camada de reboco para a primeira implica o seu atravessamento por uma interface, atribuindo uma ligeira descontinuidade no percurso da água pelo reboco, tendo a fonte de humidade menos influência na humidade relativa e temperatura da primeira camada.

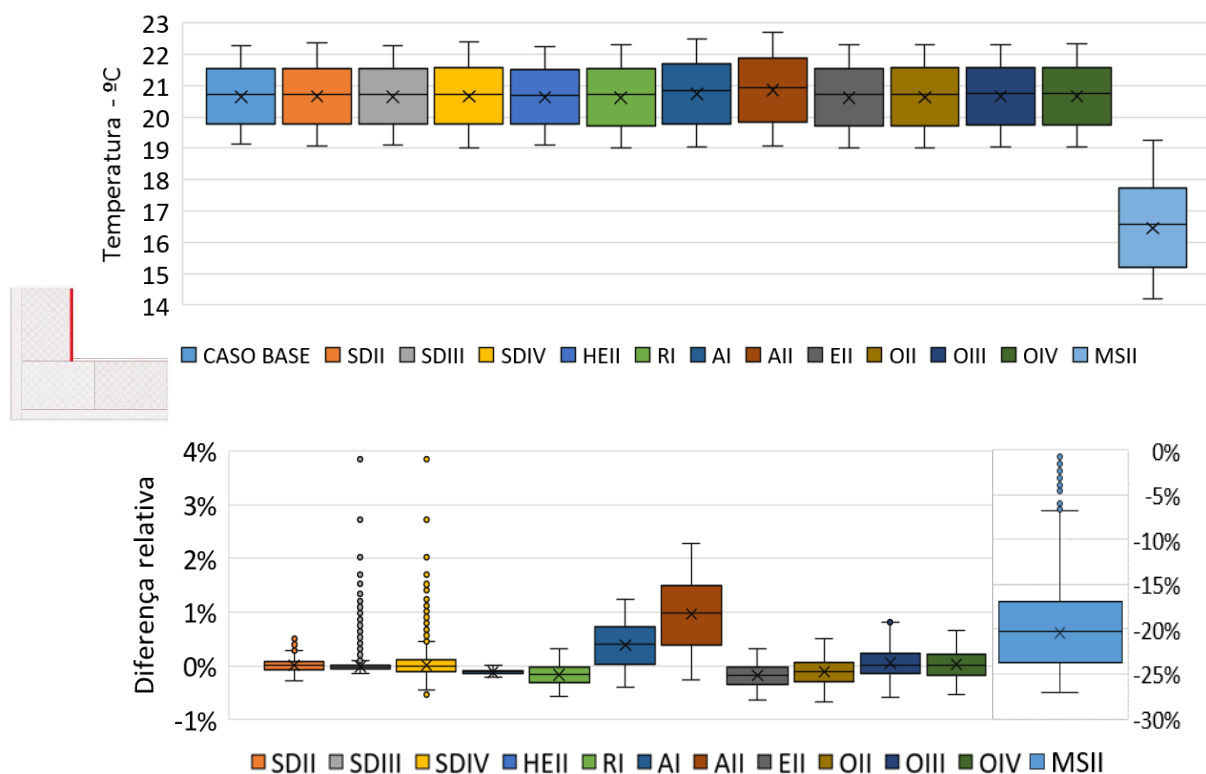


Figura 46 -Temperaturas e suas diferenças relativas na segunda camada de reboco interior

Os resultados de humidade relativa na primeira camada de reboco interior (figura 47) indicam que as simulações SDIII, SDIV e MSII são as que provocam alterações significantes nos valores de humidade relativa do reboco. As restantes simulações conduzem a resultados idênticos ao caso base.

A atribuição de um S_d elevado à superfície interior (SDIII) conduz a humidades relativas no reboco interior, em média 40% superiores (figura 47), uma vez que o vapor de água tem a sua passagem para o interior impedida (secagem pelo interior dificultada), permanecendo no reboco interior, e aumentando assim a sua humidade relativa. No caso SDIV, em que as superfícies interior e exterior apresentam um S_d elevado, são registadas humidades relativas ainda mais altas, pelo que a secagem do elemento é mais dificultada que no caso SDIII. A fonte de humidade provoca um aumento médio da humidade relativa em cerca de 70% (figura 47).

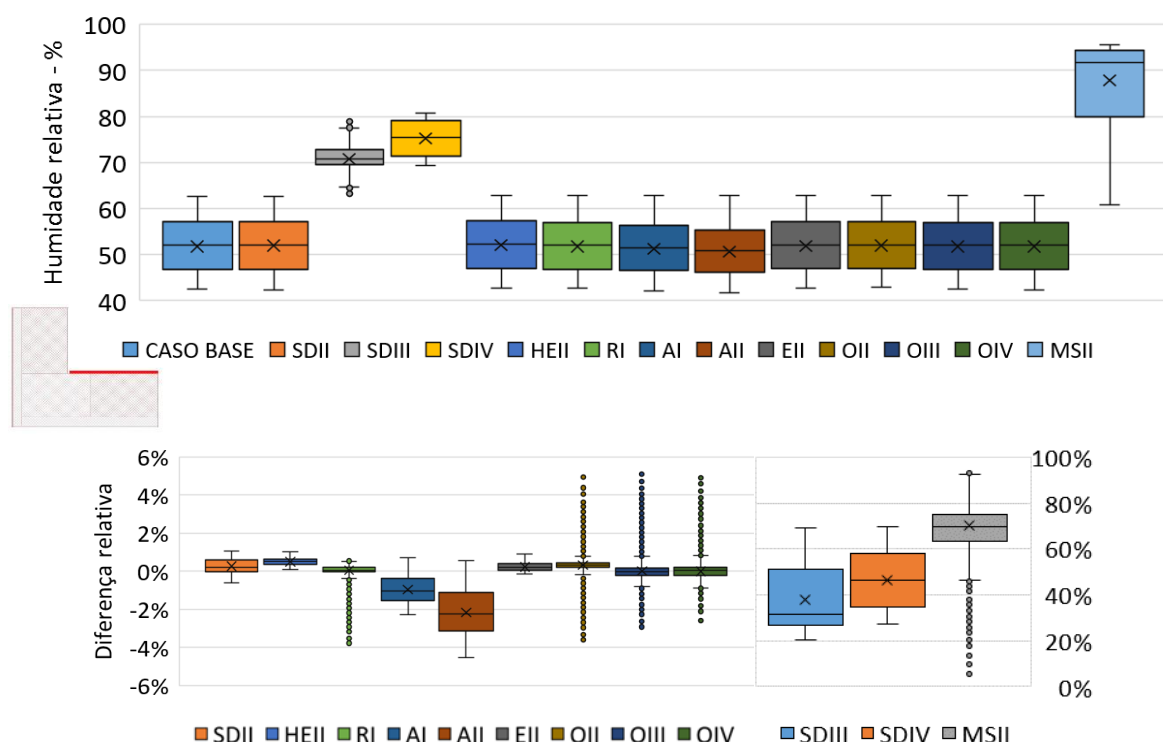


Figura 47- Humidades relativas e suas diferenças relativas na primeira camada de reboco interior

A segunda camada do reboco interior apresenta os resultados de humidade relativa indicados na figura 48. Tal como ocorre na primeira camada de reboco interior, a segunda apresenta valores de humidade relativa superiores nas simulações SDIII, SDIV e MSII. As restantes simulações apresentam variações médias nos resultados que não ultrapassam o 1%. Os resultados das simulações SDII e SDIV desta camada são da mesma ordem de grandeza que os da primeira camada. O mesmo não se verifica para a simulação MSII, pois tal como constatado nos resultados da temperatura, esta camada do reboco é mais influenciada pela fonte de humidade, exibindo humidades relativas, em média, 100% superiores ao caso base.

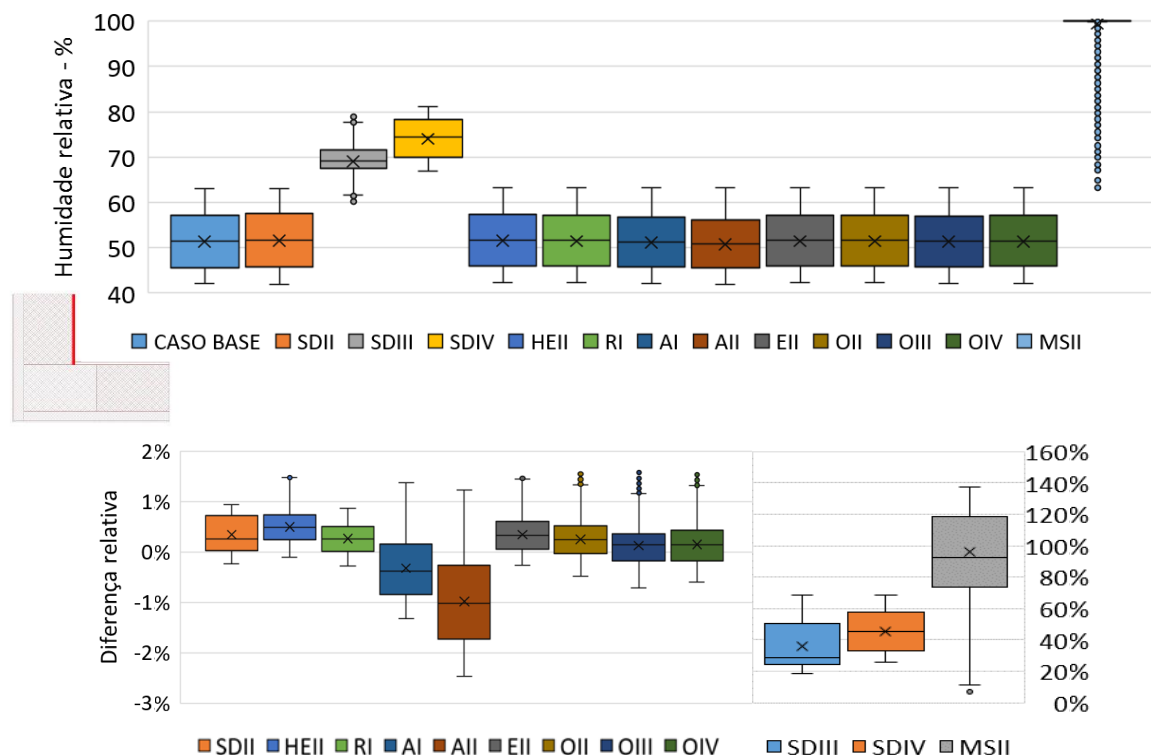


Figura 48 - Humidades relativas e suas diferenças relativas na segunda camada de reboco interior

A primeira camada do reboco exterior apresenta os resultados de temperatura indicados na figura 49, onde é visível que a alteração dos parâmetros exteriores tem mais influência nos resultados. A temperatura do reboco exterior apresenta, contrariamente ao reboco interior, vários valores atípicos e pontuais, uma vez que se encontra exposto a um clima menos estável.

Verifica-se que a alteração da orientação do elemento (OII, OII e OIV) leva a temperaturas, embora pontuais, muito superiores e inferiores ao caso base. A alteração da orientação do elemento para Este (OIII) resulta em valores pontuais até 150% mais altos e a alteração da orientação do elemento para Sul (OIV) resulta em valores pontuais até 125% mais altos (figura 49). Contudo, estas diferenças não são relevantes, pois verificam-se pontualmente.

Conclui-se que apenas a alteração do coeficiente de absorção conduz a variações médias de temperaturas significativas, pelo que as restantes simulações apresentam variações médias nos resultados que não ultrapassam os 2%. O aumento do α para 0.5 (AI) resulta em temperaturas, em média, 10% superiores e o aumento do α para 0.8 (AII) resulta em temperaturas, em média, 20% superiores.

A figura 50 representa os resultados de temperatura para a segunda camada de reboco exterior. Tal como na primeira camada, as simulações AI e AII, destacam-se por provocar aumentos médios consideráveis na temperatura. A alteração dos restantes parâmetros não influencia de forma significativa as temperaturas médias obtidas, provocando, pontualmente, diferenças elevadas.

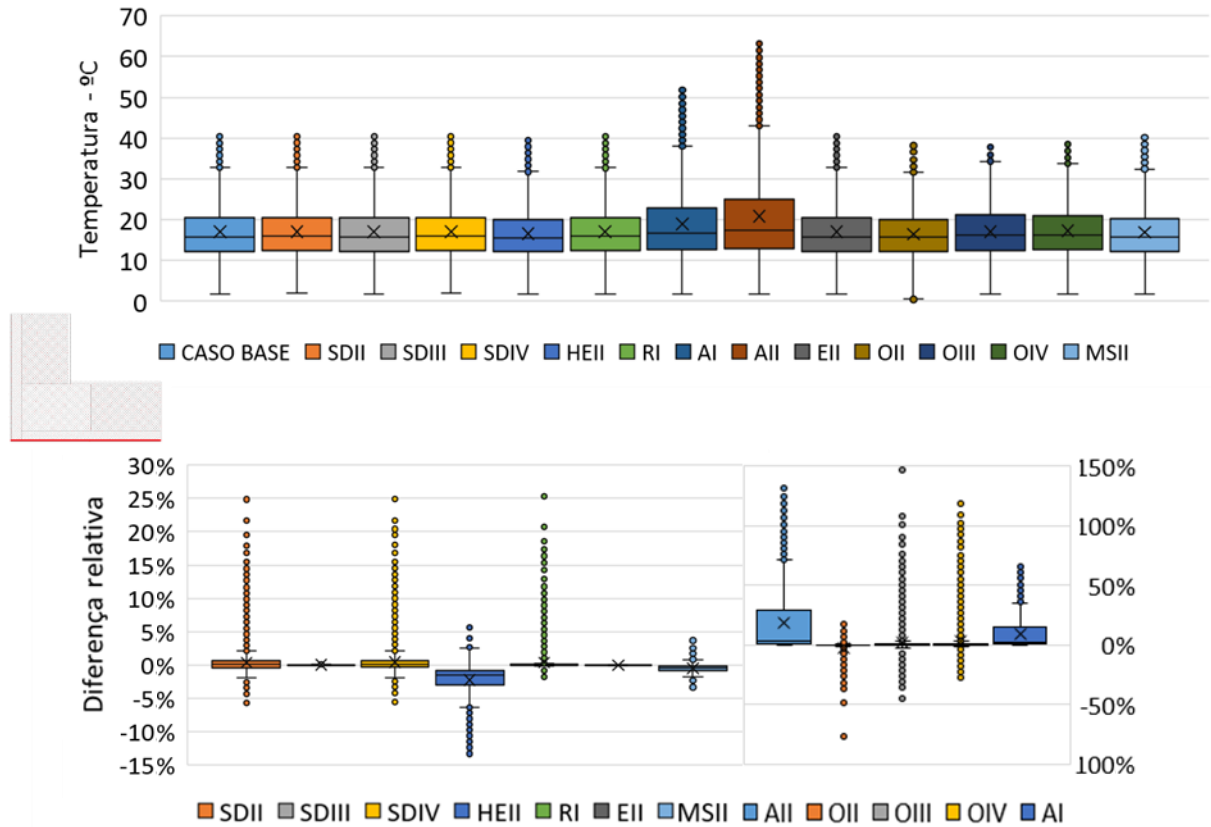


Figura 49 - Temperaturas e suas diferenças relativas na primeira camada de reboco exterior

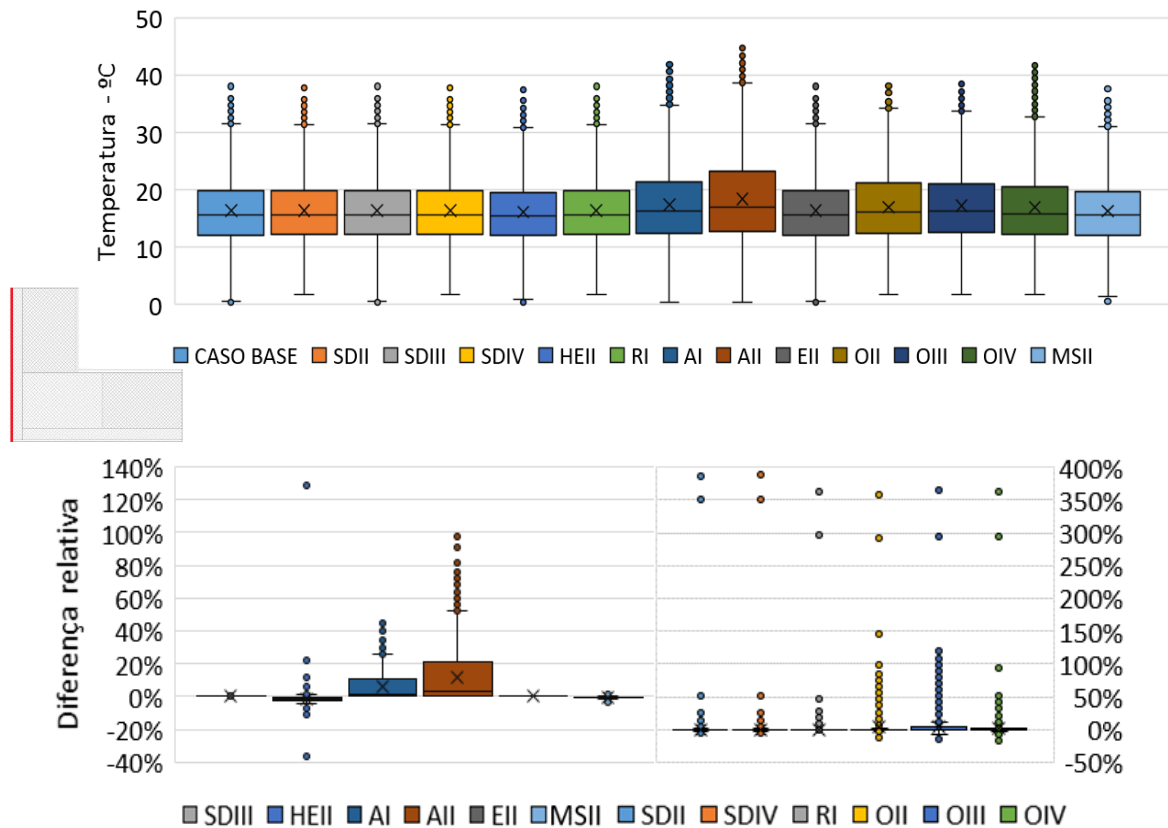


Figura 50 - Temperaturas e suas diferenças relativas na segunda camada de reboco exterior

Os resultados obtidos para a humidade relativa na primeira camada de reboco exterior estão representados na figura 51, onde se verifica maiores oscilações que nos resultados de temperatura. Observa-se que, com o aumento da espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) da superfície exterior (SDII e SDIV), a humidade relativa do reboco exterior aumenta, em média, 30%. Sendo os resultados das simulações SDII e SDIV idênticas, conclui-se que um S_d elevado na superfície interior não influencia os resultados registados no reboco exterior. O aumento deste parâmetro leva à retenção da humidade, que se desloca do interior para o exterior, pelo elemento, permanecendo na camada de reboco exterior.

As restantes simulações, com exceção da AI, AII e MSII, resultam em variações irrelevantes nos resultados de humidade relativa do reboco exterior. O aumento do α para 0.5 (AI) conduz a humidades relativas, em média, 10% mais baixas e o seu aumento para 0.8 resulta em humidades relativas, em média, 18% mais baixas, uma vez que o aumento da absorção de radiação implica o aumento da temperatura e consequente diminuição da humidade relativa.

A fonte de humidade (MSII), provoca um aumento medio de 10 % nas humidades relativas do reboco exterior. A comparação dos resultados de temperatura (figura 49) com os de humidade relativa (figura 51) permite concluir que a fonte de humidade influencia somente a humidade relativa do reboco exterior, sendo que a temperatura do reboco exterior é predominantemente influenciada pelo clima exterior, de tal forma que é pouco alterada com a fonte de humidade. O aumento da humidade relativa parece, então, contraditório, uma vez que se esperaria a secagem do reboco exterior. Contudo, a fonte de humidade apresenta um caudal constante durante o período de simulação, o que explicaria a dificuldade de secagem e o consequente aumento da humidade relativa. Os resultados de humidade relativa na segunda camada do reboco exterior (figura 52) permitem obter as mesmas conclusões que as anteriores.

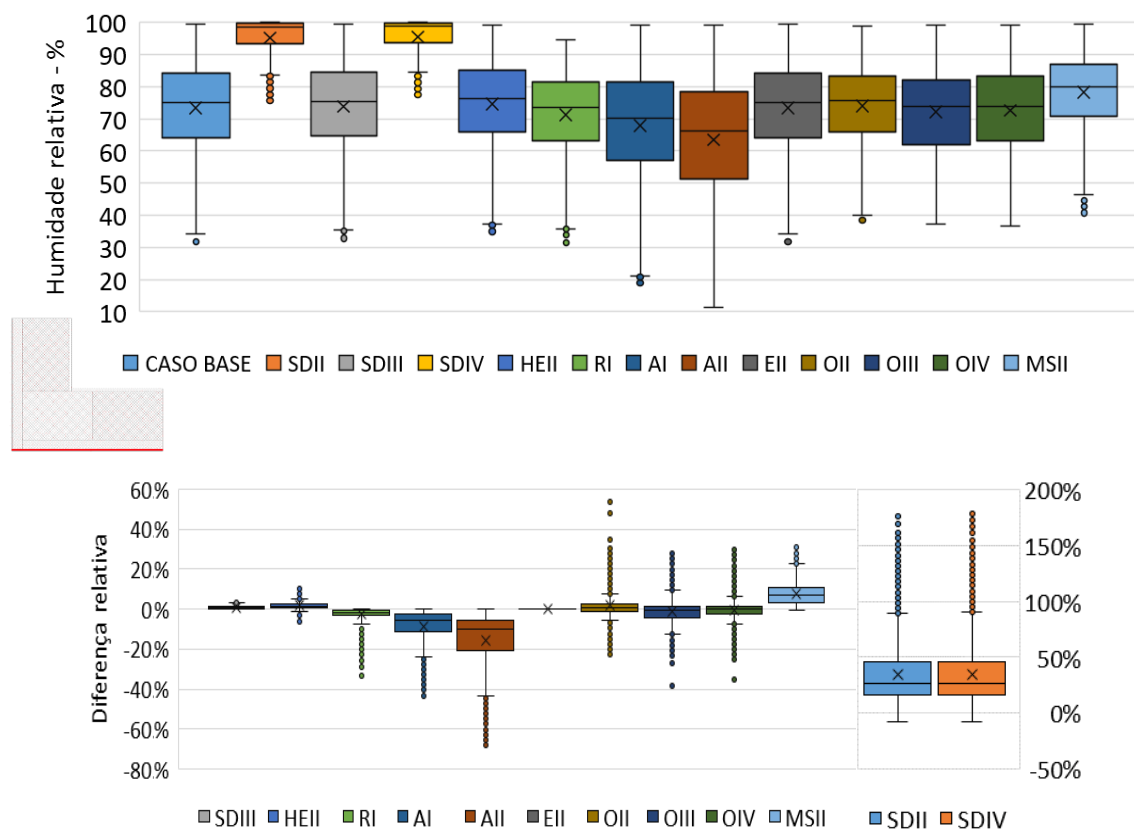


Figura 51 - Humidades relativas e suas diferenças relativas na primeira camada de reboco exterior

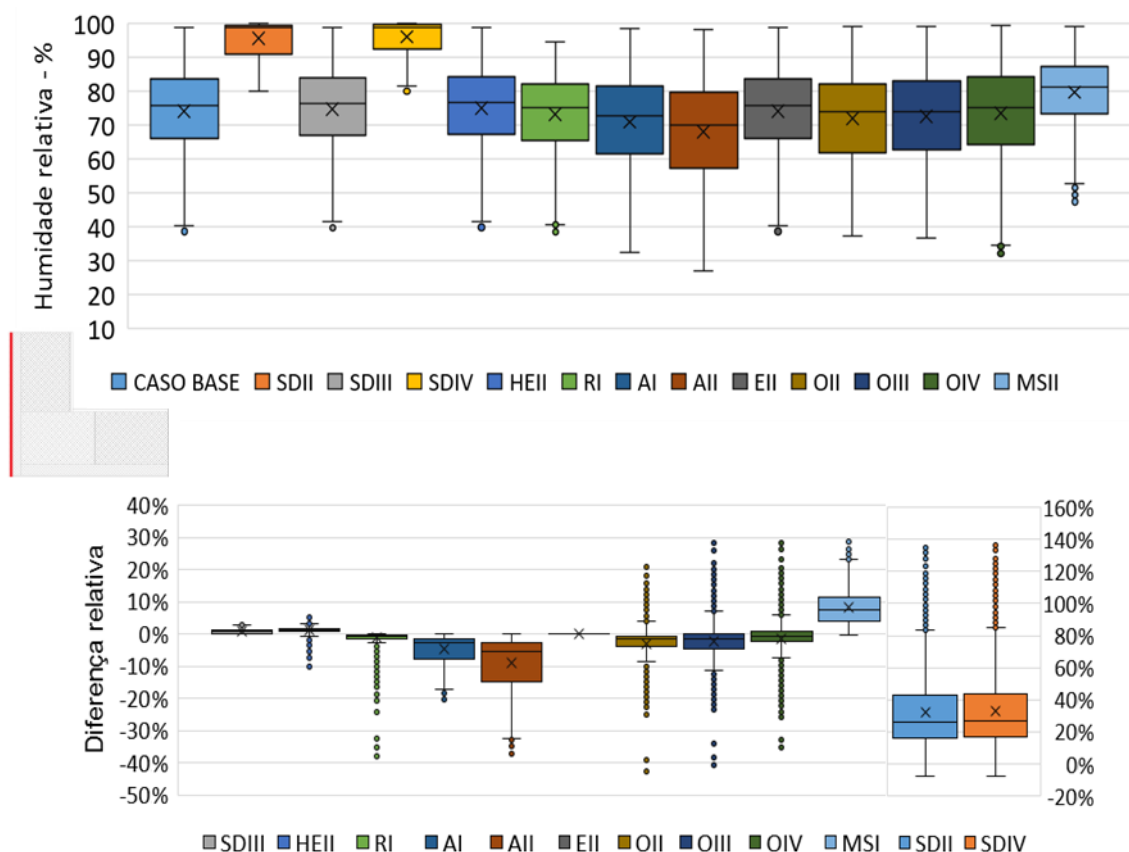


Figura 52 - Humidades relativas e suas diferenças relativas na segunda camada de reboco exterior

A partir da análise das humidades relativas e temperaturas no reboco interior e exterior, conclui-se que:

- As temperaturas do reboco interior são influenciadas, principalmente, pela fonte de humidade e pelo coeficiente de absorção, sendo que a fonte de humidade provoca a diminuição da temperatura devido à alteração das propriedades térmicas do material (coeficiente de condutibilidade) e o aumento do coeficiente de absorção aumenta a quantidade de calor recebido, provocando um aumento da temperatura;
- O aumento do Sd do reboco interior conduz a maiores humidades relativas no mesmo, devido à sua dificuldade de secagem pelo interior. A fonte de humidade provoca o aumento considerável da humidade relativa do reboco interior, uma vez que é onde se localiza a fonte. O coeficiente de absorção, embora com menos influência, provoca um ligeiro decréscimo nos resultados de humidade relativa do reboco interior;
- O coeficiente de absorção é o parâmetro que mais influencia as temperaturas do reboco exterior, sendo esta a camada que recebe a radiação. A variação da orientação e fração de chuva incidente provocam diferenças de temperatura, embora pontuais, elevadas;
- O Sd da superfície exterior é o parâmetro que mais influencia as humidades relativas do reboco exterior, sendo que um Sd elevado conduz a humidades relativas elevadas. O coeficiente de absorção, embora com menos influência, provoca um decréscimo das humidades relativas do reboco.

4

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO WUFI 2D COM OS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A termografia de infravermelhos permite a obtenção da temperatura de uma dada superfície através da medição da quantidade de radiação infravermelha que é emitida pela mesma, utilizando uma câmara termográfica/de infravermelhos. Os resultados são imagens térmicas ou termogramas, que juntamente com uma escala de cores, descrevem a temperatura da superfície analisada.

No setor da construção, esta tecnologia é usada para avaliar anomalias em circuitos elétricos, fugas de ar, acumulação de humidade, humidade ascensional e pontes térmicas, uma vez que são problemas nem sempre detetados visualmente, sendo, contudo, facilmente detetáveis com a câmara de infravermelhos porque originam variações nas temperaturas superficiais. Por exemplo, uma parede que apresente problemas de humidade ascensional, quando analisado com a câmara termográfica, apresentará temperaturas superficiais mais baixas na sua base, onde existe mais humidade, e temperaturas mais elevadas, em zonas mais altas e menos húmidas.

Ferreira [16] realizou vários ensaios de humidificação e secagem de provetes de betão leve nos quais avaliou a presença de humidade através da termografia de infravermelhos. Os resultados de parte dessa campanha experimental serão utilizados neste capítulo para serem comparados com as simulações efetuadas com o WUFI 2D, considerando condições semelhantes às dos ensaios.

4.2. METODOLOGIA

4.2.1. CASO DE ESTUDO

O provete utilizado no ensaio realizado por Ferreira [16] é constituído por betão leve e tem dimensões de 0,28m x 0,21 x 0,075m. O betão leve tem massa volúmica de 1350.8 kg/m³, absorção de 14%, capilaridade de 1,58 g/mm², permeabilidade ao vapor de 25 kg/(m.s.Pa), fator de resistência à difusão de vapor de 7.4, condutibilidade térmica de 0.7W/m²°C e emissividade de 0.91.

O ensaio realizado constituiu na secagem do provete em estufa durante 4 dias a 70°C, no seu arrefecimento numa caixa estanque com sílica gel durante 24 horas, e na sua humidificação parcial durante 24 horas no interior de uma câmara climática com condições constantes de temperatura e humidade relativa (T=20°C; HR=60%). Para a humidificação, foi garantida uma lâmina de água com 5 mm acima da base do provete durante todo período de ensaio. Os termogramas resultantes deste ensaio (figura 53) indicam a temperatura na superfície do provete (0.28m x 0.21m) para vários momentos.

Para este trabalho, foram usados os termogramas captados aos 30 minutos, 4 horas, 8 horas e 24 horas relativamente ao início da humificação. As simulações no WUFI 2D têm então o propósito de simular a humificação do provete, pela base, com uma lâmina de água de 5mm, durante 24 horas numa câmara climática à temperatura de 20°C e humidade relativa de 60%.

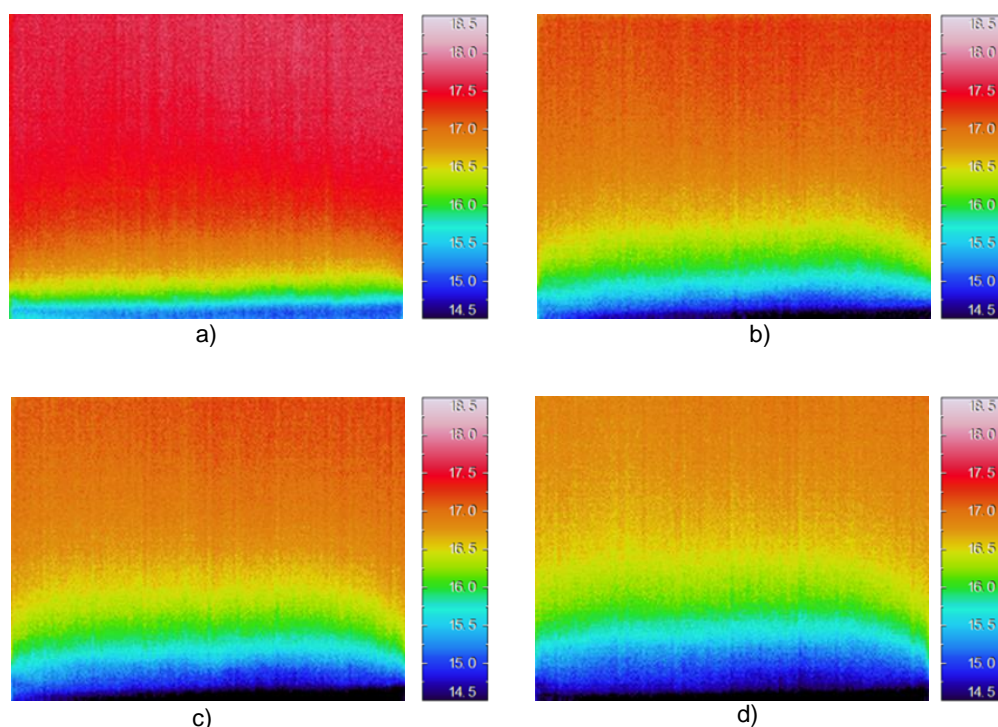


Figura 53 -Termogramas do provete durante a humificação para a) $t=0.5h$, b) $t=4h$, c) $t=8h$, d) $t=24h$

4.2.2. CONSTRUÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL

A aproximação dos perfis de temperatura conseguidos no WUFI 2D aos da termografia de infravermelhos implica transformar os perfis de temperatura fornecidos pelo WUFI 2D, que indicam temperaturas numa camada intermédia, em perfis de temperatura superficial. Só assim os resultados das simulações poderão ser comparáveis com os resultados da termografia.

A obtenção dos perfis de temperatura superficial a partir do WUFI 2D é feita com a execução de duas simulações, uma para cada corte vertical do provete (I-longitudinal e II-transversal). Assim, as simulações I e II tratam de faces de 280mm x 210mm e 75mm x 210mm, respetivamente. A simulação I resulta em perfis de temperatura numa face interior do provete, paralela à superfície, que é estudada nos termogramas da figura 53 e a simulação II resulta em perfis de temperatura numa face interior do provete, perpendicular à primeira. A figura 54 representa os dois perfis de temperatura, I e II no provete de betão.

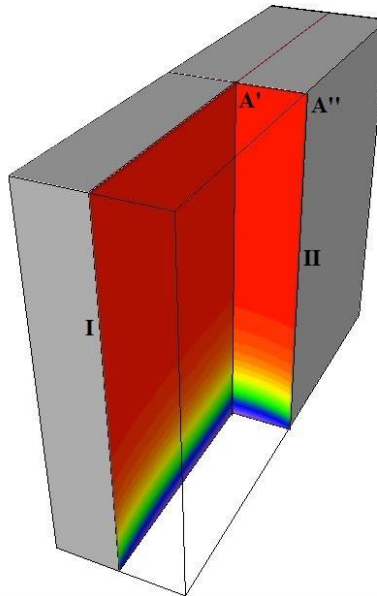


Figura 54- Perfis de temperatura no provete de betão

Partindo do princípio que o comportamento na direção transversal é o mesmo ao longo do desenvolvimento do provete, definido pelo perfil de temperatura II, é possível gerar o perfil de temperatura à superfície do provete. Para tal, no perfil II, a coluna de temperaturas do centro (A') é subtraída à coluna de temperaturas da extremidade (A''), resultando numa coluna de diferenças de temperatura. Esta coluna é depois somada a todo o perfil de temperatura I, originando um novo perfil de temperatura, o perfil de temperatura superficial.

4.2.3. SIMULAÇÕES NO WUFI 2D

4.2.3.1. Avaliação de diferentes formas de simulação de humedificação

Relativamente aos dados de entrada nas simulações I e II, estas apresentam as seguintes diferenças:

- A simulação I corresponde a um retângulo de 280mm x 210mm e a simulação II a um retângulo de 75mm x 210mm;
- O número de elementos da malha foi atribuído, de forma a ser igual ao número de pixéis dos termogramas, assim, a simulação I tem uma malha de 189 x 143 elementos e a simulação II tem uma malha de 52 x 143 elementos.

O material atribuído a ambas as geometrias corresponde a um betão leve com as características anteriormente referidas, conseguido com criação de um novo material e introdução das suas propriedades na base de dados do WUFI 2D. As condições iniciais da simulação são: temperatura de 20°C e humidade relativa de 60%.

O período de simulação foi 24 horas sendo os *time steps* de 5 minutos. Relativamente às condições fronteira, todas as superfícies têm condutância térmica superficial de 8W/m²K e Sd igual a 0m. Às arestas superior e laterais do provete, atribuiu-se o clima da câmara climática (a vermelho na figura 55): temperatura constante de 20°C e humidade relativa constante de 60%. À aresta inferior, que está em contacto com água (a azul na figura 55), foram-lhe atribuídos os seguintes climas, de forma a identificar a situação mais representativa da humedificação do provete pela base:

- HR=100% e T=20°C (S1);
- HR=100% e T=12°C: O ar nas superfícies superior e laterais do provete encontra-se com T=20°C e HR=60%. Quando este mesmo ar se encontra saturado de vapor de água (HR=100%), a sua temperatura é 12°C (S2);
- HR=100% e T=15°C (temperatura estimada da água), com a adição de uma fonte de humidade na última linha de elementos na malha (S3). Esta fonte de humidade fornece $1.389 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ de água, equivalente a 5mm por hora;
- Clima exterior de HR=100%, T=15°C (temperatura estimada da água) e com chuva de 5mm por hora de simulação (S4).

É de frisar que, relativamente às fontes de humidade, o WUFI 2D não permite a definição da temperatura da água, pelo que foi necessário estimar o seu valor e aplicá-lo à fronteira.

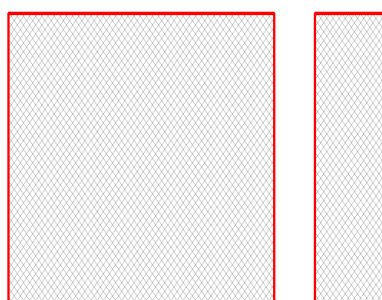


Figura 55- Fronteiras e geometrias do provete na simulação I(esquerda) e II(direita)

Os perfis de temperatura I e II para os casos S1, S2, S3 e S4 foram construídos no programa Surfer e encontram-se no anexo II, tal como os perfis superficiais de temperatura construídos (SUP). Para comparar as quatro soluções com os termogramas fornecidos foram analisadas as temperaturas registadas em três linhas: uma na extremidade superior do perfil, uma na extremidade inferior, e uma no centro (figura 56).

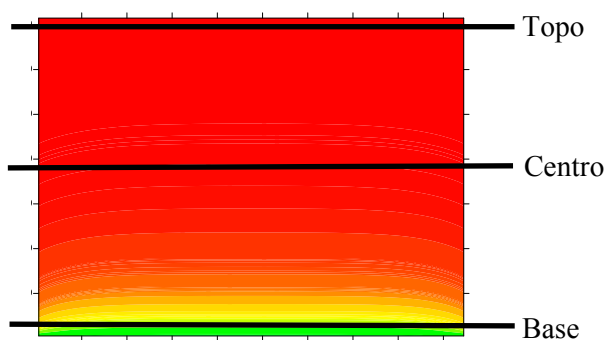


Figura 56- Localização das temperaturas usadas na comparação de casos

As temperaturas no topo do provete para $t=0.5\text{h}$, $t=4$, $t=8$ e $t=24\text{h}$ nos quatro casos e termograma estão representadas na figura 57. O topo do provete, de acordo com os resultados da termografia, está seco e apresenta uma temperatura constante ao longo do seu comprimento: aos 30 minutos esta é 17.7°C, baixando e estabilizando para os 17°C, até às 24h (figura 57).

Durante todo o período de simulação, as temperaturas resultantes das simulações no WUFI 2D apresentam valores superiores, comparativamente aos termogramas. Numa fase inicial da humidificação do provete ($t=0.5\text{h}$), as temperaturas registadas no topo do provete são iguais para as quatro simulações,

e são cerca de 20°C, correspondendo à temperatura inicial do provete e do clima envolvente, introduzida no programa. Com o decorrer do tempo ($t=4h$, $8h$ e $24h$), as temperaturas das simulações S2, S3 e S4 sofrem um decréscimo progressivo, que é maior no centro do provete, como se pode observar pela concavidade voltada para cima das curvas S2, S3 e S4, enquanto a temperatura na simulação S1 sofre um aumento, também maior no centro do provete, como se pode observar pela concavidade voltada para baixo da curva S1. Conclui-se que no topo do provete, predomina o efeito do clima na câmara climática, pois as alterações em S2, S3 e S4 não conduzem a diferenças significativas.

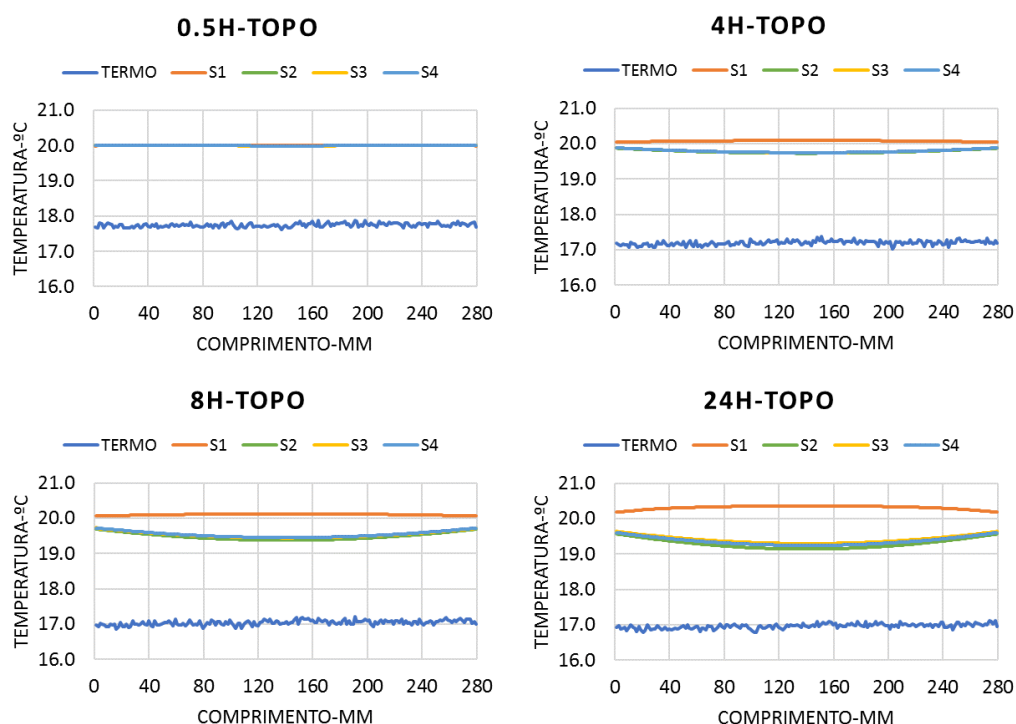


Figura 57 -Temperaturas obtidas nas diferentes simulações no topo do provete

As temperaturas registadas na linha central do provete estão representadas na figura 58. No centro de provete, como no topo, observa-se um decréscimo progressivo da temperatura nas simulações do WUFI 2D, sendo que as suas curvas apresentam as mesmas configurações que nos gráficos da figura 57. As temperaturas obtidas são, em todos os casos, mais baixas que as observadas no topo do provete, devido à maior proximidade à fonte de humidade na base do provete. Mais uma vez, as temperaturas nos termogramas apresentam um valor constante ao longo do comprimento do provete, sendo os resultados da simulação S2 os mais próximos. As simulações S3 e S4 apresentam, sensivelmente, os mesmos valores de temperatura, tanto no topo como no centro do provete, como se pode observar nas figuras 57 e 58. A figura 59 indica as temperaturas registadas na base do provete, onde são mais evidentes as diferenças entre as várias formas de simulação de humidificação.

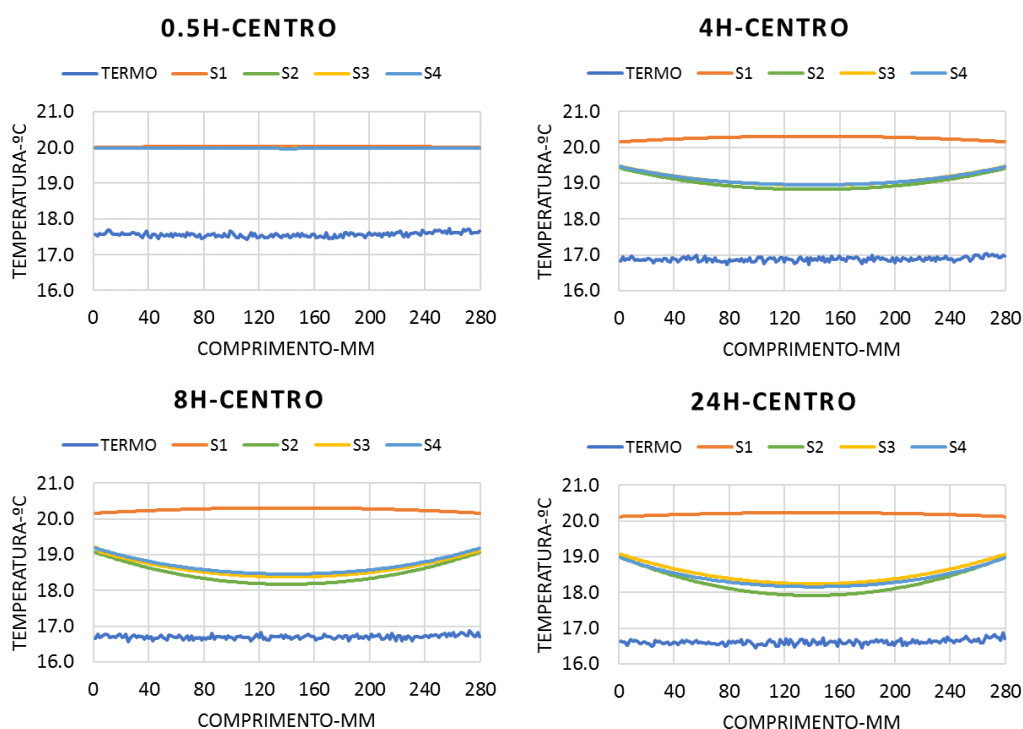


Figura 58-Temperaturas obtidas nas diferentes simulações no centro do provete

Observa-se na base do provete (figura 59) uma maior proximidade dos resultados das simulações S2, S3 e S4 às temperaturas dos termogramas, porém, a simulação S1 resulta em temperaturas bastante mais elevadas que as dos termogramas.

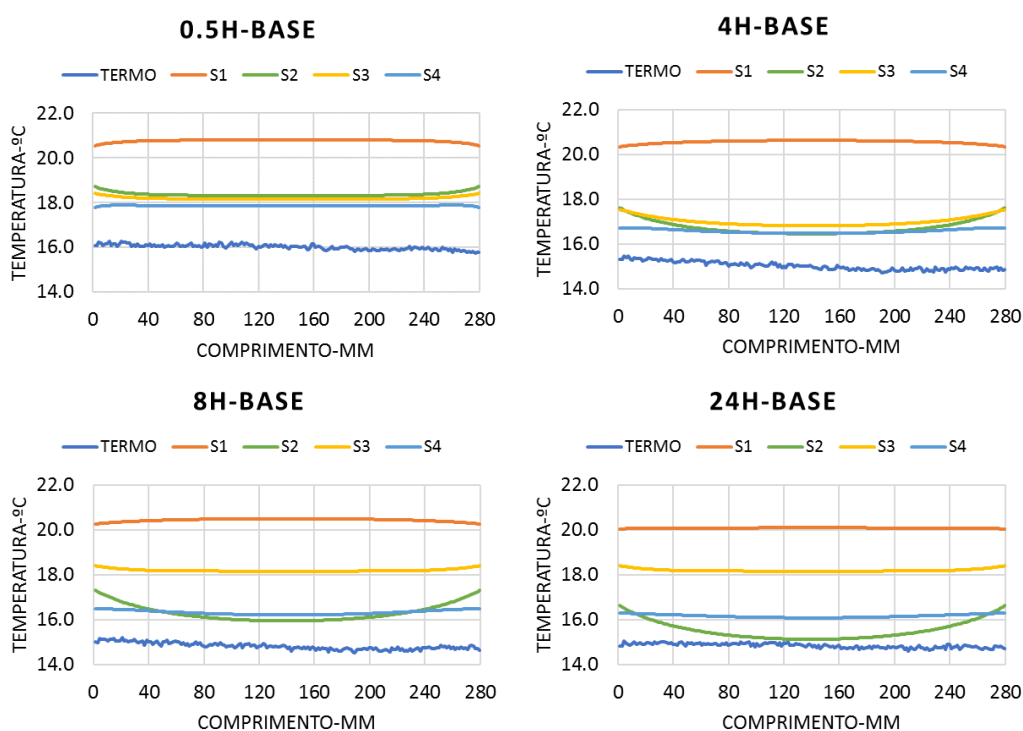


Figura 59- Temperaturas obtidas nas diferentes simulações na base do provete

Partindo da análise das três secções dos perfis de temperatura, representados nas figuras 57, 58 e 59, conclui-se que:

- Comparativamente aos termogramas, as simulações no WUFI 2D sobrestimam o fenómeno de evaporação de água nas laterais do provete. As temperaturas nas laterais do provete são mais elevadas que no meio, pois a maior área exposta ao clima da câmara promove a secagem, e consequentemente, há um decréscimo do teor de humidade e um aumento das temperaturas;
- A simulação S1 resulta em curvas de temperatura com concavidade para baixo, apresentando temperaturas quase constantes em cerca de 20°C ao longo do provete;
- Entre as simulações S1 e S2, a simulação S2 conduz a resultados de temperatura mais semelhantes aos termogramas, pelo que a temperatura de 12°C na fronteira inferior é mais representativa da humificação do provete;
- Entre as simulações S3 e S4, esta última apresenta os resultados mais próximos aos dos termogramas, apresentado também as suas curvas de temperatura configuração semelhante às dos termogramas;
- Entre as simulações S2 e S4, as curvas de temperatura S4 são as que mais se assemelham às do termograma, uma vez que apresentam valores de temperatura próximos e não apresentam concavidade na base do provete.

4.2.3.2. Ajuste dos perfis de temperatura aos termogramas

Embora a simulação S4 resulte em temperaturas mais próximas às reais, estas continuam bastante mais elevadas durante todo o período de simulação. Assim, de forma a aproximar os resultados da simulação aos reais, as novas fronteiras do provete terão um clima associado baseado nos termogramas.

Desta forma, a simulação S4 é repetida com as seguintes condições (simulação A):

- O clima da câmara climática apresenta HR=60% e T=17.7°C. Esta temperatura corresponde ao valor médio das temperaturas registadas no topo do provete aos 30 minutos, retiradas do termograma fornecido, considerando-se este valor o mais representativo da temperatura inicial das superfícies do provete e da câmara climática;
- As condições iniciais do provete são também HR=60% e T=17.7°C de maneira a não causar um gradiente de temperatura adicional;
- A fronteira na base do provete é inalterada, correspondendo a um clima exterior de HR=100%, T=15° (temperatura da água estimada) e com chuva de 5mm por hora.

Com isto foram observadas temperaturas mais próximas às reais, no entanto, ainda desfasadas (como se pode observar nas figuras 60, 61 e 62). Contudo, uma nova alteração da temperatura da câmara climática ou do provete é despropositada, uma vez que as maiores diferenças de temperatura observadas são na base do provete, sendo razoável alterar as condições da fronteira inferior.

Assim, a simulação S4 é novamente repetida (simulação B) com as mesmas condições da câmara climática e condições iniciais da simulação anterior, sendo alterada a temperatura do clima exterior associado à base do provete: esta passa a ser 12°C pela mesma razão explicitada no § 4.2.3.1, ou seja, o ar nas superfícies superior e laterais do provete encontrar-se-ia com T=20°C e HR=60%. Quando saturado de vapor de água (HR=100%), a sua temperatura é 12°C.

Os gráficos seguintes representam as temperaturas no topo (figura 60) e centro (figura 61) do provete na simulação inicial (A), na simulação reformulada (B) e nos termogramas (TERMO). Destes gráficos, conclui-se que no início da simulação, os resultados das simulações A e B são praticamente iguais. Observa-se uma aproximação das temperaturas simuladas às dos termogramas quando a temperatura da

fronteira inferior diminui para 12°C (simulação B). É observada uma maior influência da temperatura da fronteira inferior, na base e no centro do provete.

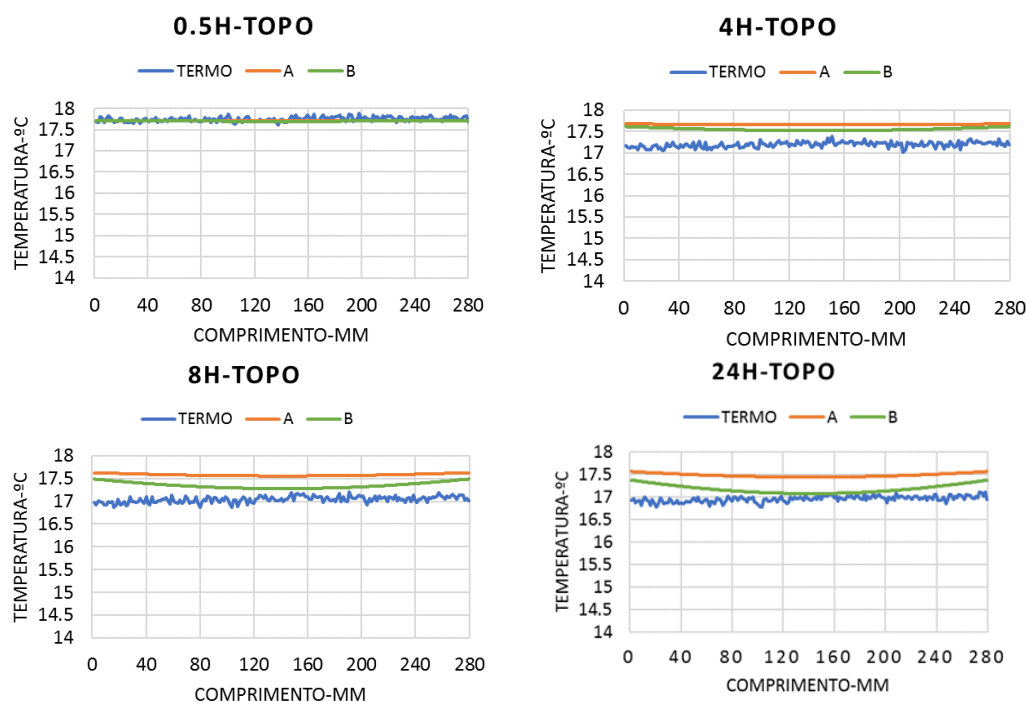


Figura 60 - Temperaturas obtidas nas simulações A e B; e termogramas no topo do provete

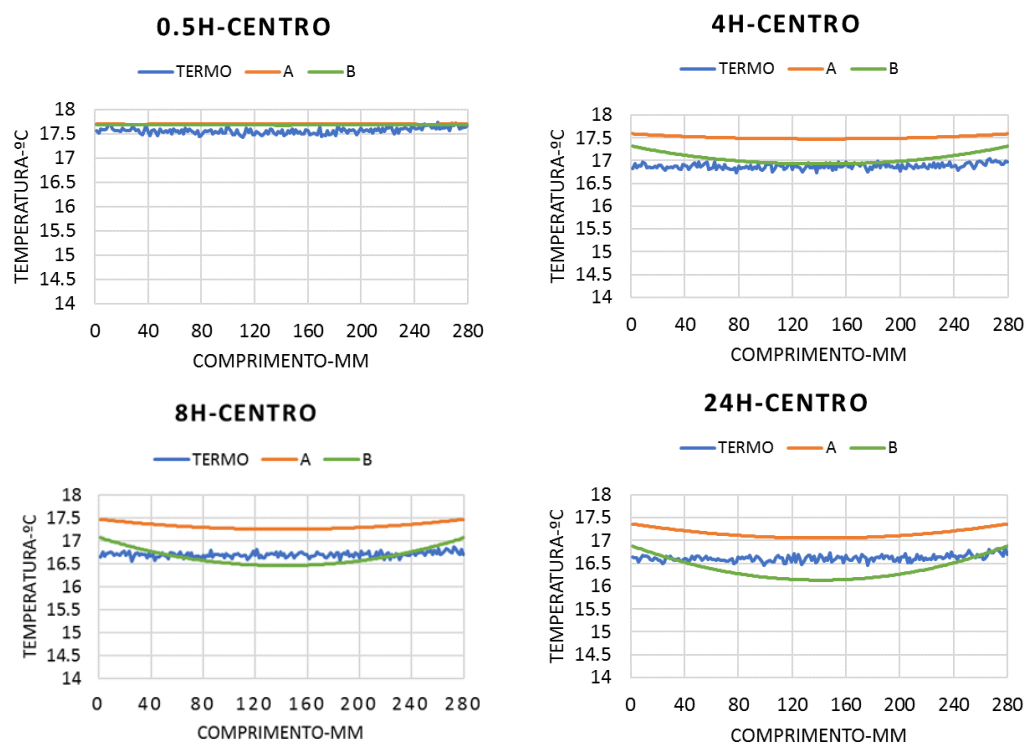


Figura 61- Temperaturas obtidas nas simulações A e B; e termogramas no centro do provete

Os gráficos da figura 62 representam as temperaturas na base do provete para as mesmas simulações A e B, onde se observa que a redução da temperatura na base do provete, que é onde se verificava maiores diferenças de temperatura entre a simulação A e os termogramas, foi conseguida com a simulação B. Contudo, como já foi dito, as simulações resultam em valores sobrestimados de temperatura, tal como o fenómeno de evaporação nas extremidades do provete, já que entre as simulações A, B e o termograma, verificam-se maiores diferenças de temperatura nas laterais do provete.

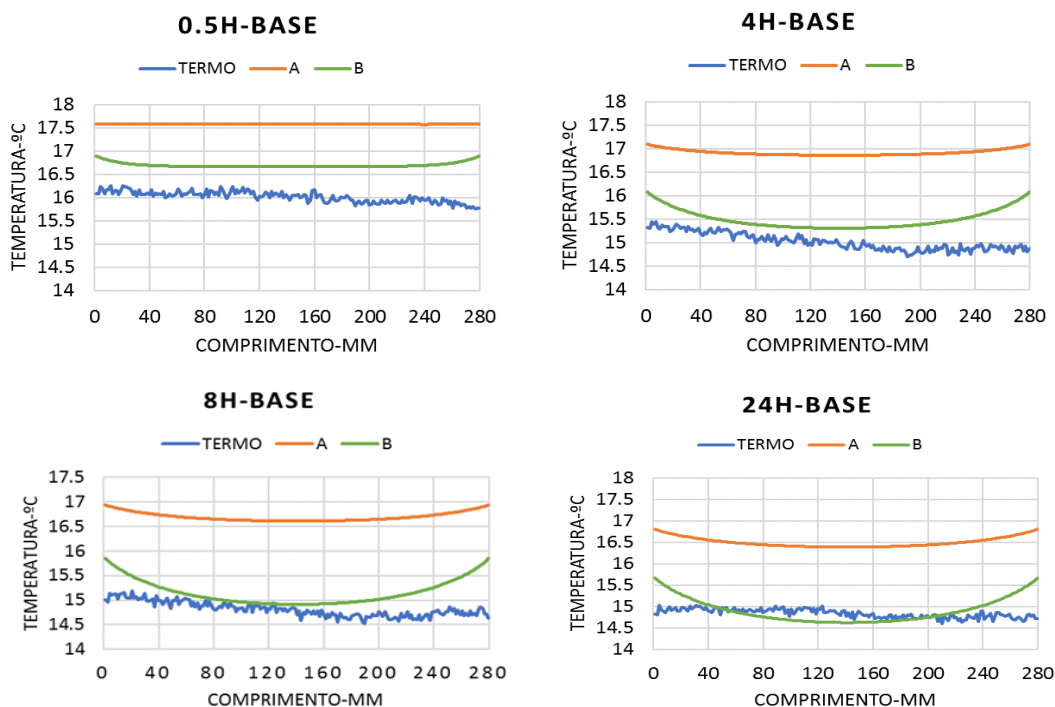


Figura 62-Temperaturas obtidas nas simulações A e B; e termogramas na base do provete

As diferenças entre os resultados das simulações e termogramas (figura 60, 61 e 62) encontram-se quantificadas no quadro 13, que indica as diferenças médias, em valor absoluto, entre as temperaturas das simulações A e B relativamente aos termogramas. Conclui-se que a simulação B conduz a diferenças de temperatura significativamente mais baixas que a simulação A, principalmente no centro e base do provete.

Quadro 13-Diferenças médias absolutas ente A e TERMO; e B e TERMO

Diferenças médias(°C)		A vs TERMO	B vs TERMO
Topo	t=0.5h	0.06	0.06
	t=4h	0.47	0.36
	t=8h	0.54	0.31
	t=24h	0.53	0.22
Centro	t=0.5h	0.14	0.12
	t=4h	0.63	0.17
	t=8h	0.62	0.15
	t=24h	0.54	0.27
Base	t=0.5h	1.56	0.68
	t=4h	1.90	0.48
	t=8h	1.88	0.34
	t=24h	1.66	0.23

4.3. RESULTADOS

Foi considerada como a simulação mais representativa do caso real a simulação B, com as seguintes condições:

- Clima da câmara climática: HR=60% e $T=17.7^{\circ}\text{C}$;
- Condições iniciais do provete: HR=60% e $T=17.7^{\circ}\text{C}$;
- Condições fronteira na base do provete: clima exterior de HR=100%, $T=12^{\circ}\text{C}$ e com chuva de 5mm por hora.

O tratamento dos perfis resultantes para $t=0.5\text{h}$, $t=4\text{h}$, $t=8\text{h}$ e $t=24\text{h}$ no programa *Surfer*, permite a representação gráfica dos mesmos. Este mesmo tratamento foi aplicado aos termogramas. As figuras 63, 64, 65 e 66 representam os termogramas e os perfis de temperatura da simulação.

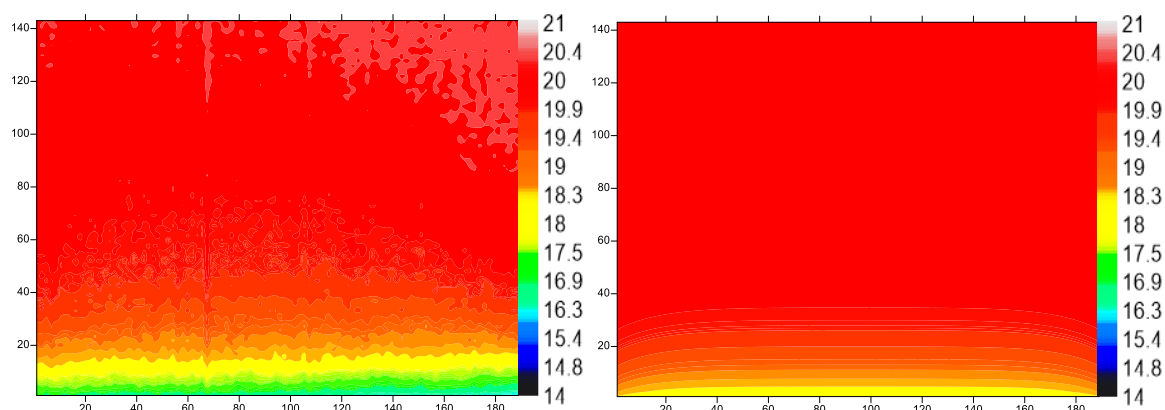


Figura 63 – Termograma (esquerda) e perfil de temperatura simulado (direita) do provete para $t=0.5\text{h}$

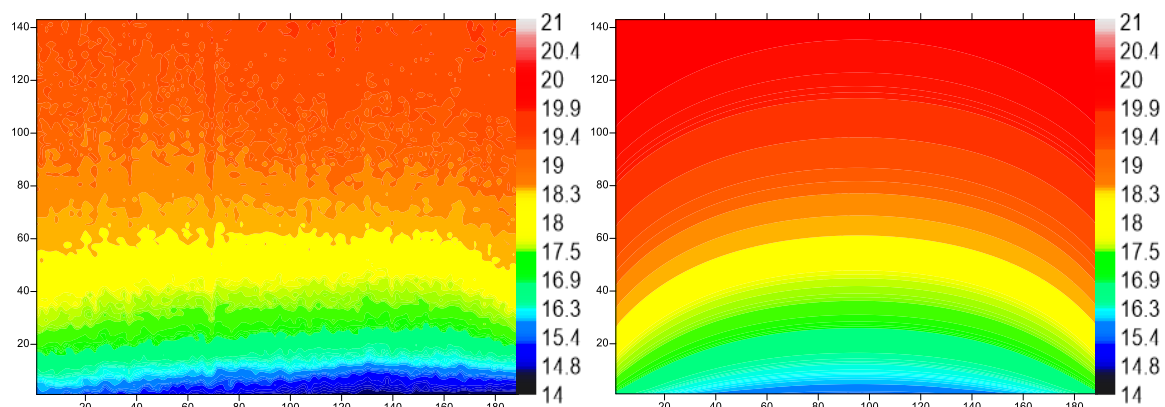


Figura 64 - Termograma (esquerda) e perfil de temperatura simulado (direita) do provete para $t=4\text{h}$

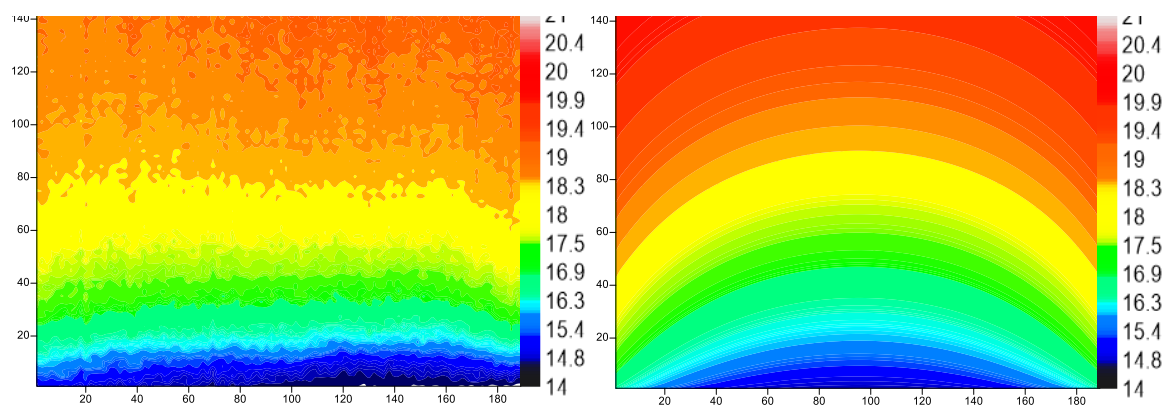


Figura 65 - Termograma (esquerda) e perfil de temperatura simulado (direita) do provete para $t=8\text{h}$

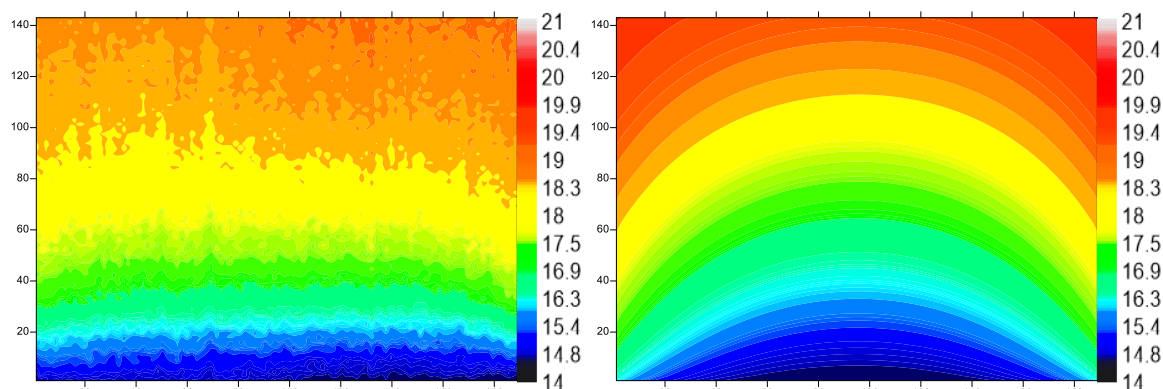


Figura 66 - Termograma (esquerda) e perfil de temperatura simulado (direita) do provete para $t=24h$

Partindo da análise das figuras anteriores, conclui-se que:

- Os resultados da simulação conduzem a padrões de temperatura semelhantes aos reais;
- As simulações no WUFI 2D produzem perfis de temperatura simétricos, o que não se verifica nos termogramas analisados;
- O programa, como foi já concluído, sobrestima o fenómeno de evaporação nas laterais do provete, pelo que nos resultados dos termogramas este fenómeno é menos evidente: os termogramas apresentam isolinhas quase retas, enquanto que os perfis da simulação apresentam isolinhas com forma côncava;
- A ascensão da água é sobrestimada na simulação, uma vez que o provete apresenta um arrefecimento mais rápido que o observado na realidade.

Admitindo uma tolerância de 2% relativamente aos resultados da simulação, os gráficos da figura 67 assinalam a azul as zonas do provete onde as temperaturas resultantes da simulação excedem em mais de 2% as reais, e a vermelho, as zonas do provete onde as temperaturas resultantes da simulação são pelo menos 2% inferiores às reais.

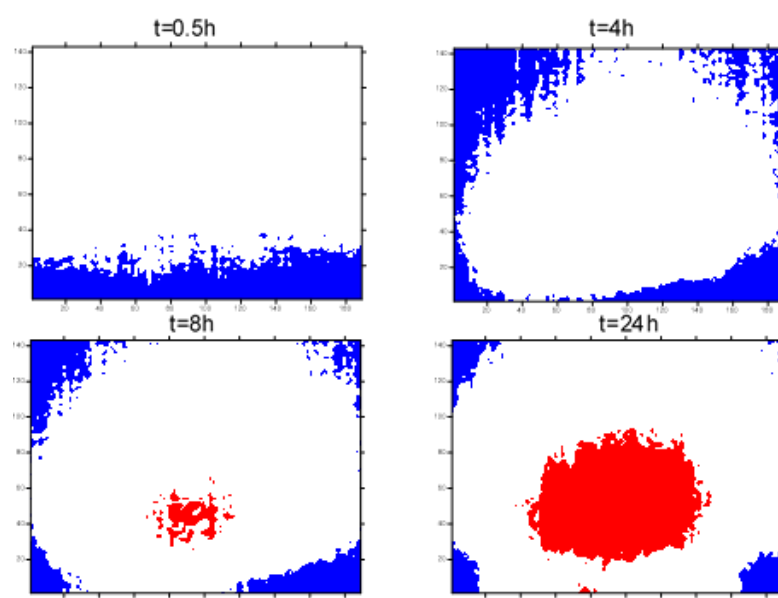


Figura 67- Zonas do provete onde a temperatura varia em mais de $\pm 2\%$

Observa-se na figura 67 que:

- No início da simulação ($t=0.5h$), as temperaturas na base do provete são sobrestimadas, visto que a fronteira adotada na base, embora conduza a resultados próximos aos reais no final das 24 horas, não representa com precisão as condições reais de humidificação no início da simulação. Isto resulta em valores de temperatura mais elevados na base. Também no início da simulação, o perfil resultante é o que mais se assemelha ao termograma, uma vez que as condições iniciais usadas na simulação foram retiradas do termograma de $t=0.5h$;
- Em $t=4h$, observam-se diferenças positivas nas laterais do provete, evidenciando a sobrestimação da evaporação nas extremidades;
- No final da simulação, o centro do provete apresenta valores de temperatura mais baixos que os reais, isto é, a diminuição da temperatura por ação da água é, na simulação, mais acelerada e crítica.

5

CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações realizadas no âmbito da análise de sensibilidade do WUFI 2D permitiram retirar as seguintes conclusões:

- A espessura da camada de ar de difusão equivalente influencia principalmente a camada onde é aplicada, e atua predominante na transferência de humidade no elemento construtivo, sendo a transferência de calor praticamente independente deste parâmetro. De igual forma, a fração de chuva incidente afeta principalmente a humidade relativa da camada onde é aplicada, i.e a camada exterior;
- A condutância térmica superficial está relacionada com o fluxo de calor na superfície, que afeta predominantemente a temperatura da camada onde é aplicada;
- O coeficiente de absorção e a emissividade são dos parâmetros que mais influenciam a temperatura e humidade relativa do elemento construtivo;
- A orientação do elemento influencia a temperatura global do elemento, pois esta define a quantidade de radiação solar incidente na superfície. No entanto, por esta apresentar um α baixo, as diferenças observadas nas simulações referentes à orientação foram pequenas. De igual forma, a orientação influencia a humidade relativa do elemento, definindo a quantidade de chuva incidente na superfície;
- A colocação de uma fonte de humidade provoca um aumento considerável da humidade relativa da camada onde se encontra e das camadas adjacentes, tal como uma diminuição das suas temperaturas. De entre os parâmetros associados à humidade, este foi o que mais influenciou a temperatura e humidade relativa das camadas. O comportamento da humidade é influenciado pelas características da camada onde se encontra a fonte e das camadas adjacentes.

A comparação dos resultados da simulação no WUFI 2D com as imagens térmicas obtidas durante a humidificação pela base de um provete de betão leve permitiu retirar as seguintes conclusões:

- O programa tende a sobrestimar os fenômenos de transferência de calor, sendo que os perfis resultantes apresentam temperaturas inferiores às reais no centro do provete- sobrestimação da ascensão da água- e temperaturas superiores às reais nas laterais do provete- sobrestimação do efeito de evaporação à superfície;
- O WUFI 2D não permite a atribuição de uma temperatura à fonte de humidade, pelo que tiveram de ser realizados ajustes às condições da fronteira na base do provete, de modo a obter a melhor representação do fenómeno de humidificação pela base;

- O programa não fornece resultados de temperatura à superfície. Por isso, foi utilizada a metodologia explicada no §4.2.2, no sentido de obter temperaturas mais viáveis para a superfície do provete;
- A definição do material no WUFI 2D implicou a atribuição de algumas características e propriedades de um betão genérico ao betão leve, uma vez que não eram conhecidos os seus valores reais, propiciando um comportamento higrotérmico do provete ligeiramente diferente ao seu comportamento real.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Sugerem-se os seguintes trabalhos e desenvolvimentos no sentido do aperfeiçoamento da aplicação de simulação higrotérmica 2D na avaliação de transferência de calor em fenómenos de humificação:

- Caracterização experimental das propriedades higrotérmicas do betão leve;
- Utilização de outros programas de simulação higrotérmica para comparação com os resultados obtidos;
- Aplicação desta metodologia a outros casos de estudo, no sentido de validar as conclusões obtidas neste trabalho.

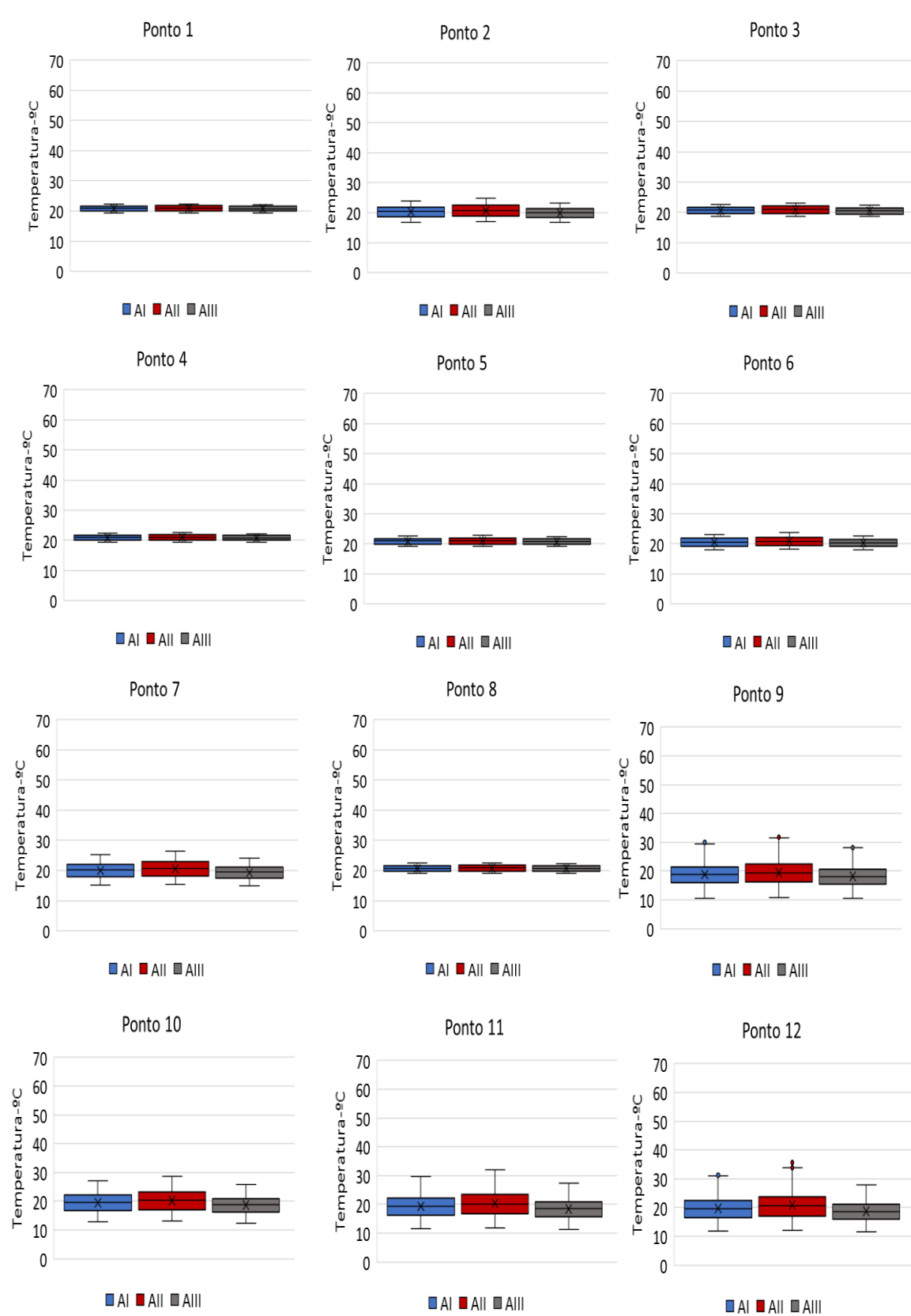
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

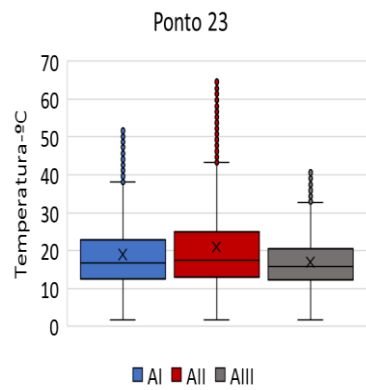
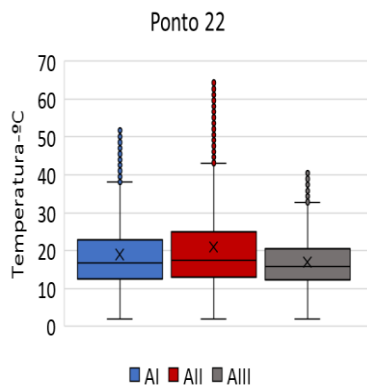
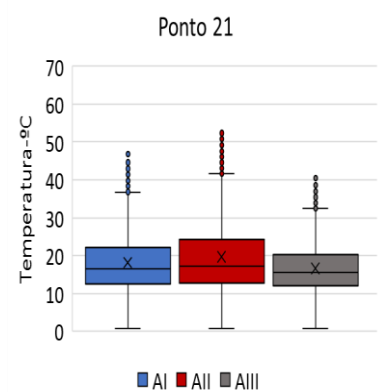
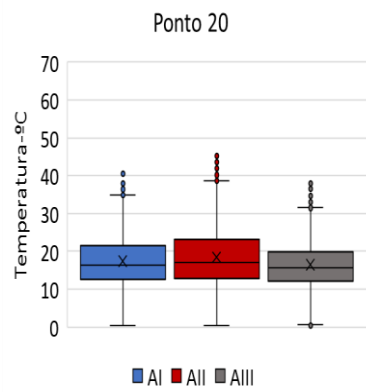
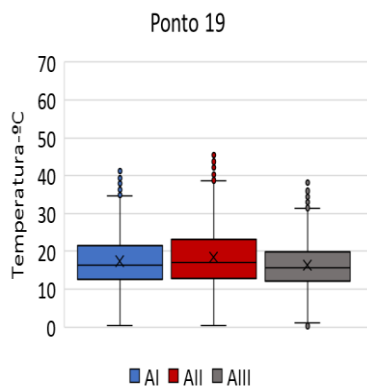
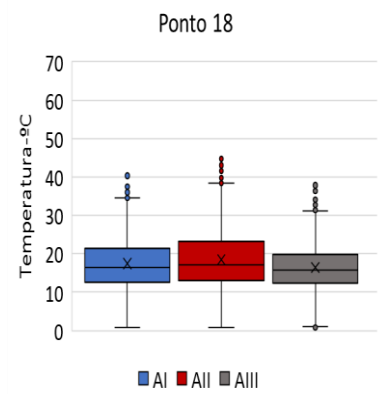
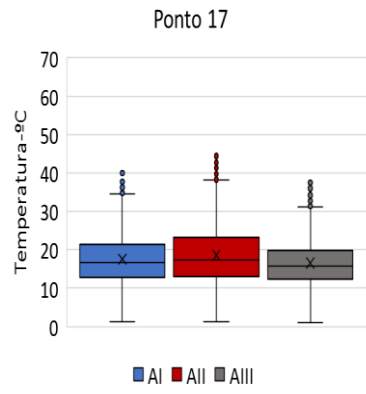
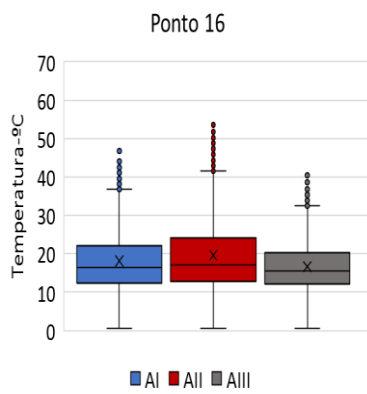
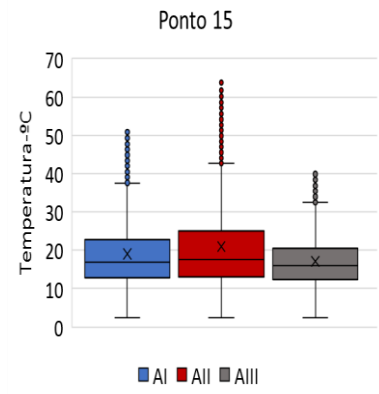
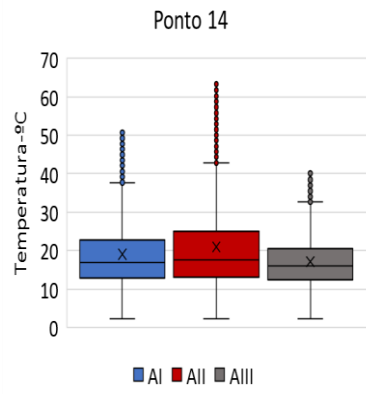
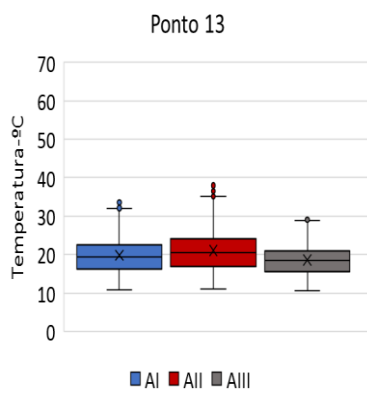
- [1] J. Dalton, Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester, 1802.
- [2] H. S. L. Hens, Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises, 2nd Edition, 2012.
- [3] Moran e Shapiro, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 4th Edition, 2000.
- [4] Freitas e Pinto, “Permeabilidade ao vapor de materiais de construção : condensações internas NIT 002,” LFC, 1998.
- [5] J. Lstiburek, “BSI-028: Energy Flow Across Enclosures,” 1 December 2009. [Online]. Available: <https://buildingscience.com/documents/insights/bsi-028-energy-flow-across-enclosures>. [Acedido em 13 April 2018].
- [6] H. M. Künzl, “Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components,” 1995.
- [7] “WUFI Wiki,” 8 July 2009. [Online]. Available: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics>. [Acedido em 5 April 2018].
- [8] E. S. B. M. Barreira, Degradação bilógica de fachadas com sistemas de isolamento térmico pelo exterior devida ao desempenho higrotérmico, Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2010.
- [9] P. d. Santos e L. Matias, Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente de edifícios, vol. ITE 50, LNEC, 2006.
- [10] Saadani, Ou ben moh, Rahmoune e Sbaibi, “Numerical Solutions of Luikov and Philipe and De Vries Equations of Heat and Mass Transfer in Porous Media,” 2013.
- [11] M. Qin, R. Belarbi, A. Ait-Mokhtar e L.-O. Nilsson, “Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials,” *Construction and Building Materials*, 2009.
- [12] D. C. Neto e Daian, “Experimental analysis of moisture transport in consolidate porous media under temperature gradient,” 1991.
- [13] Ďurana, Kočí, Maděra, Pokorný e Černý, “Modification of the computational model of coupled heat and moisture transport: The transition between the liquid and gaseous phases of water,” 2015.
- [14] Ramos, Delgado, Barreira e Freitas, “Hygrothermal Numerical Simulation: Application in Moisture Damage Prevention,” 2010.
- [15] D. B. Ramos e Freitas, “PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS UTILIZADAS EM SIMULAÇÃO NUMÉRICA,” 2009.
- [16] J. P. B. Ferreira, A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS NA AVALIAÇÃO DOS FENÓMENOS DE HUMIDIFICAÇÃO E SECAGEM, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2016.
- [17] “Wikimedia commons,” 9 June 2006. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_en.png. [Acedido em 15 April 2018].

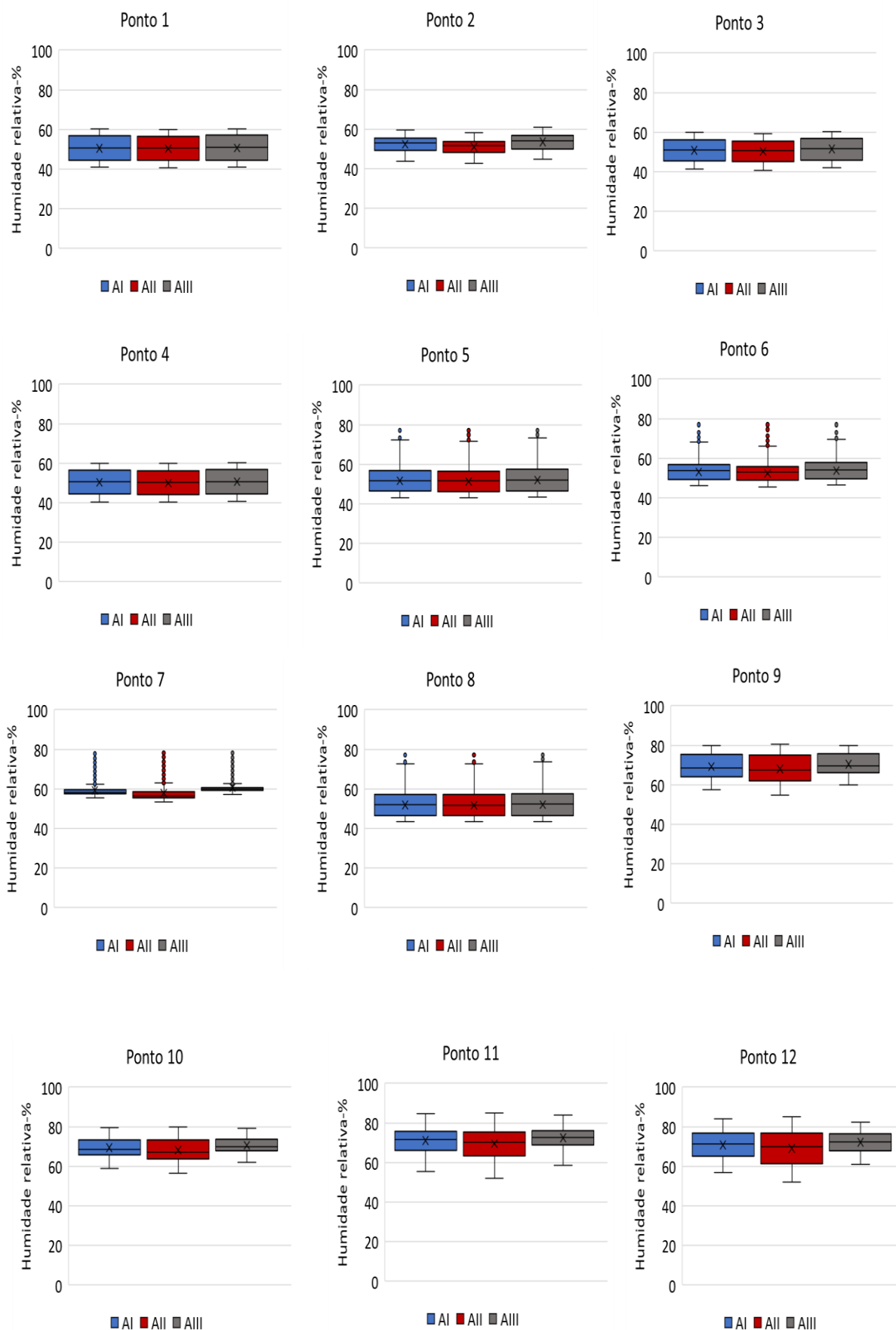
Anexo I

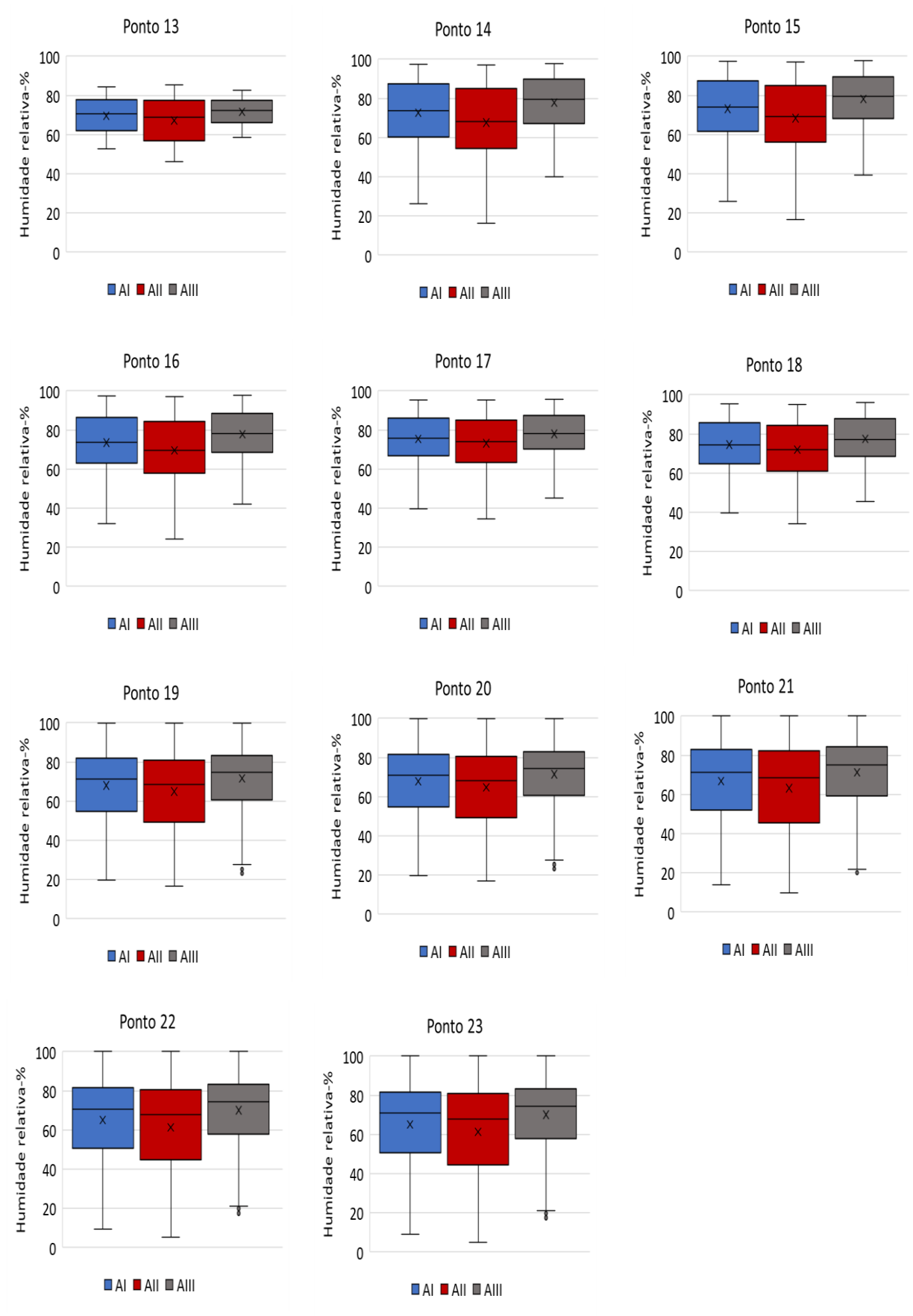
Resultados de temperatura e humidade relativa das simulações no WUFI 2D

Coeficiente de absorção solar: AI, AII, AIII

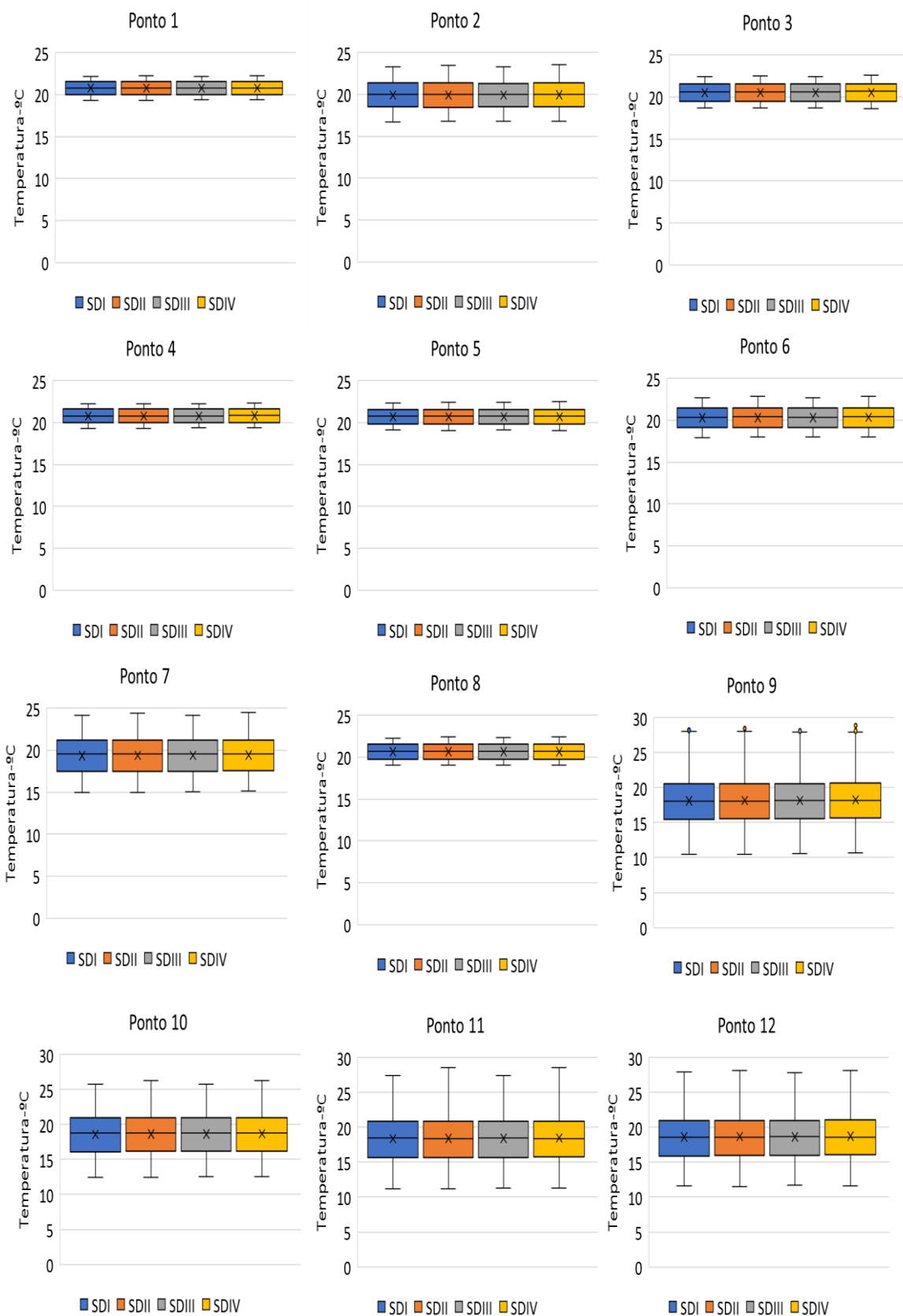


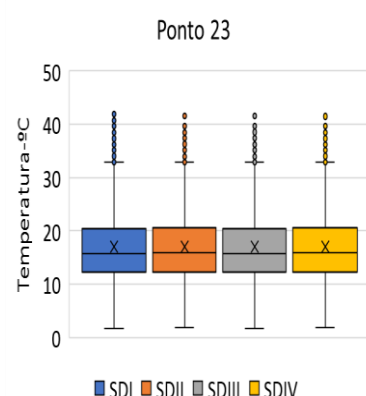
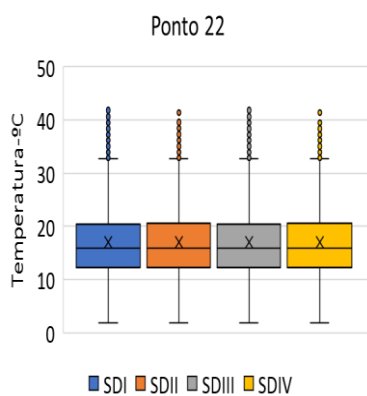
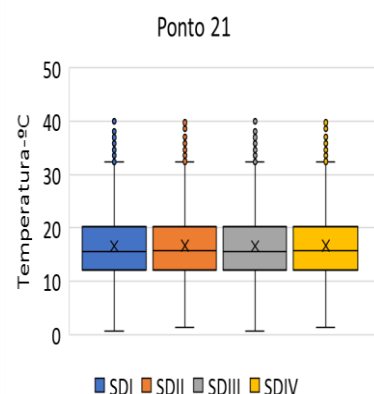
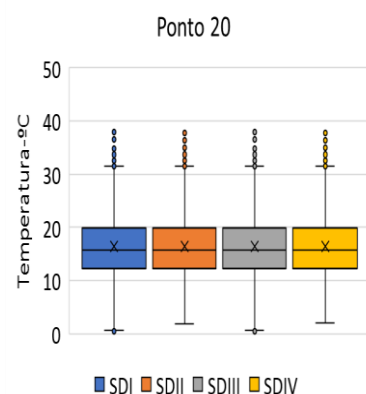
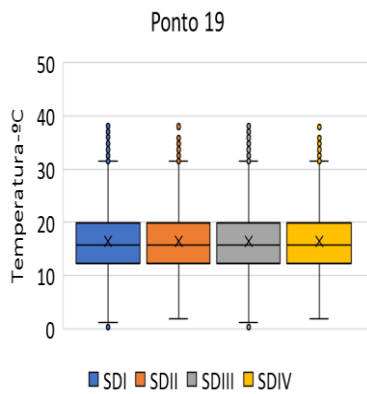
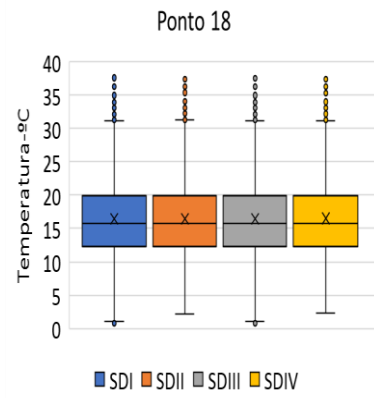
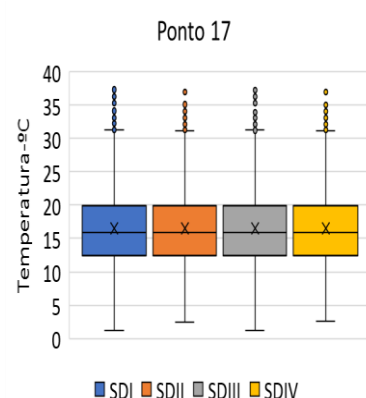
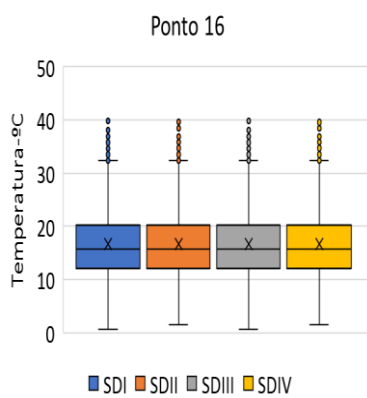
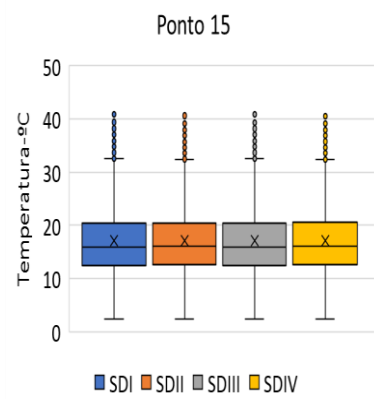
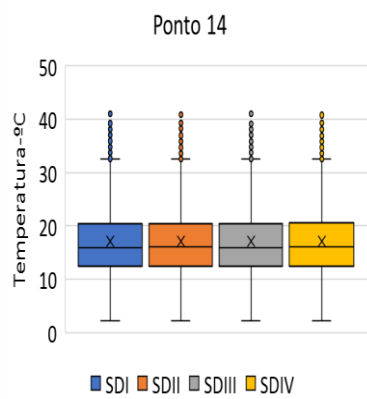
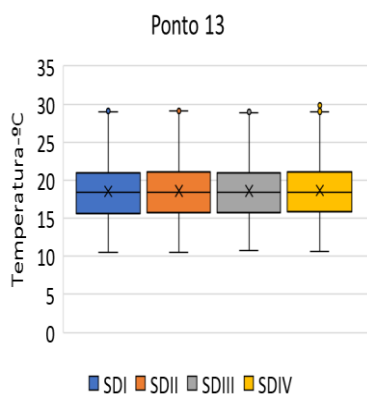


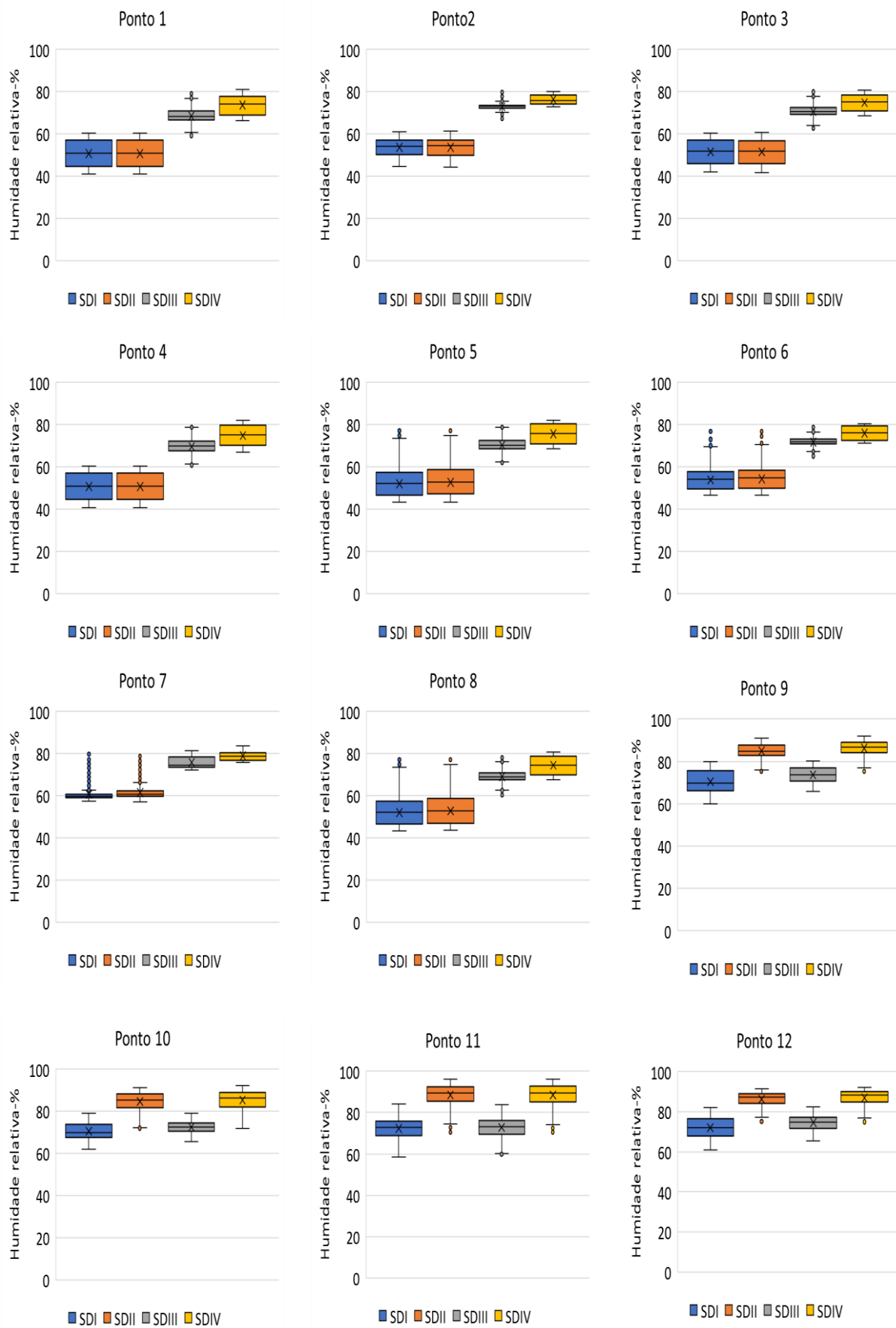


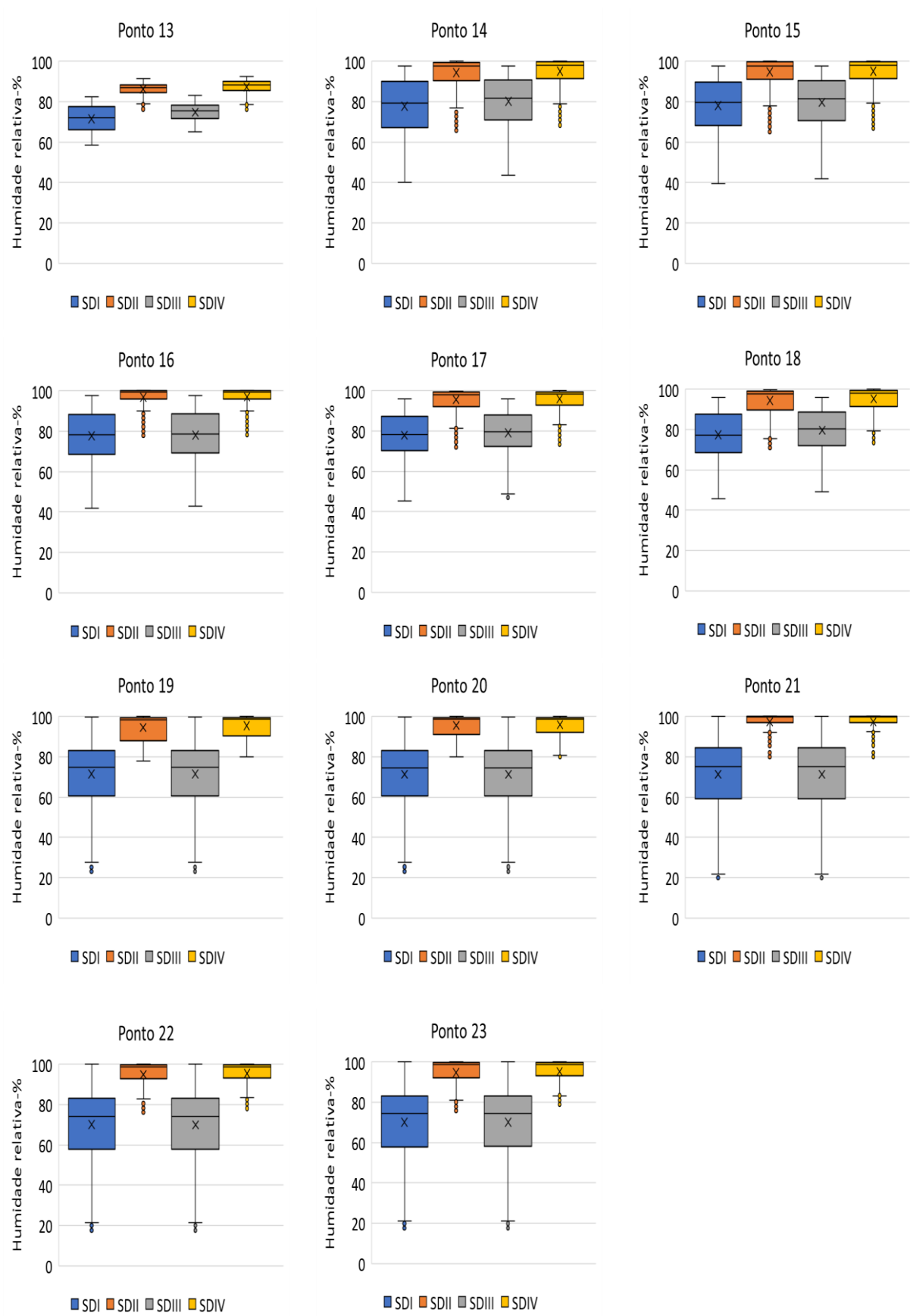


Coeficiente superficial de permeabilidade ao vapor de água: SDI, SDII, SDIII, SDIV

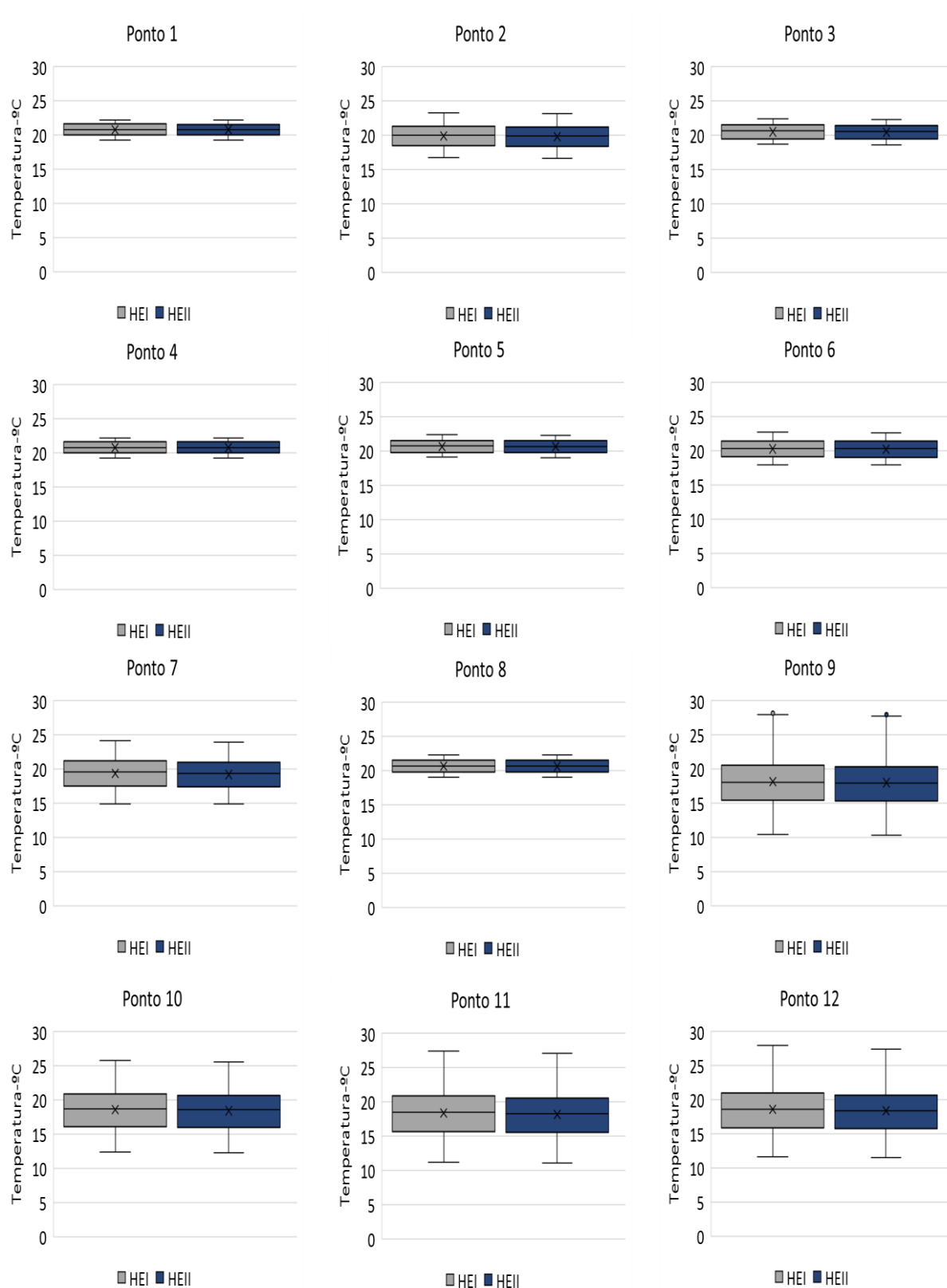


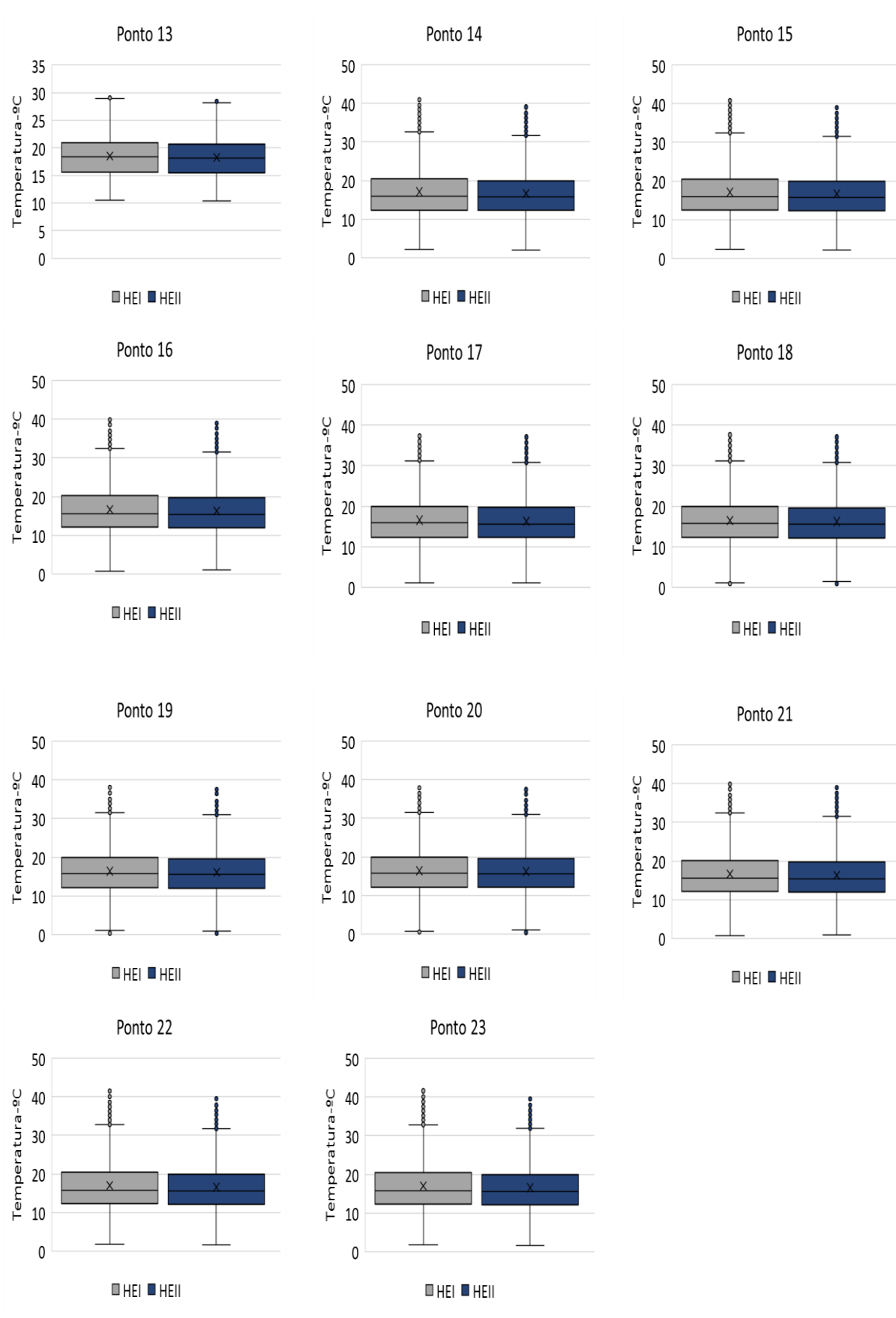


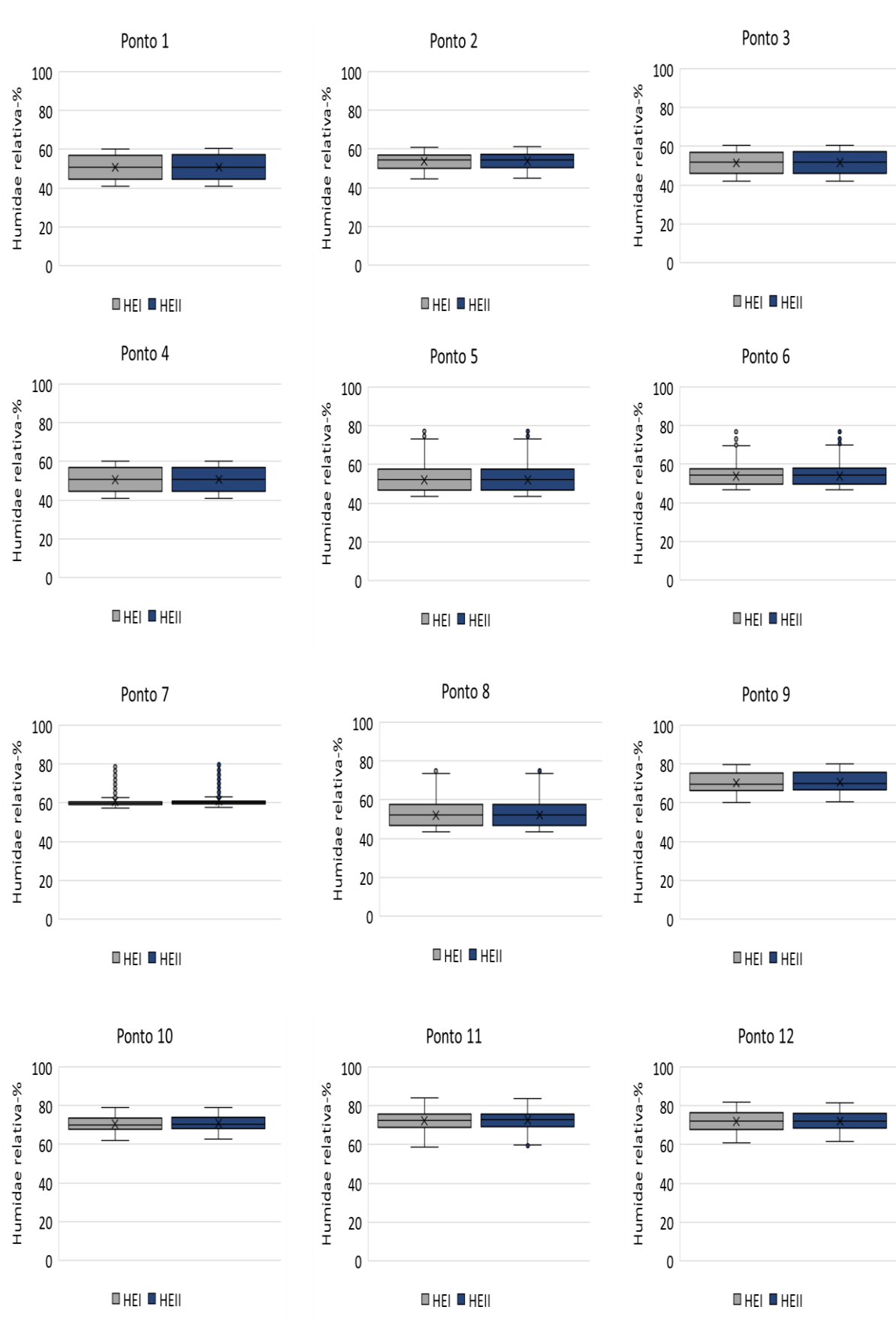


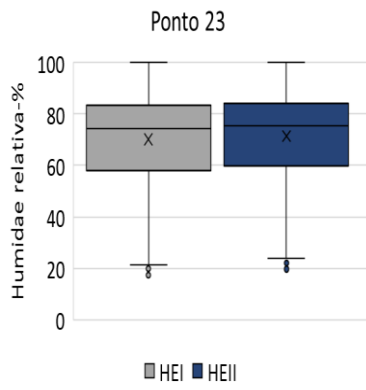
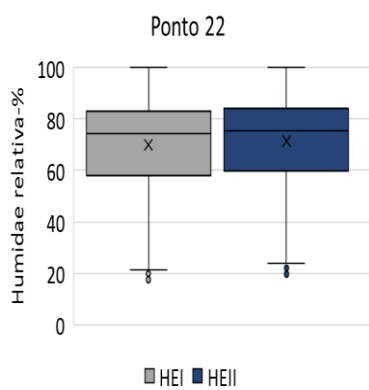
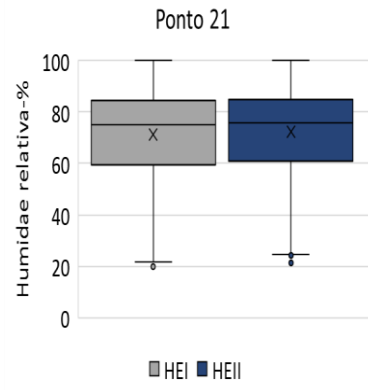
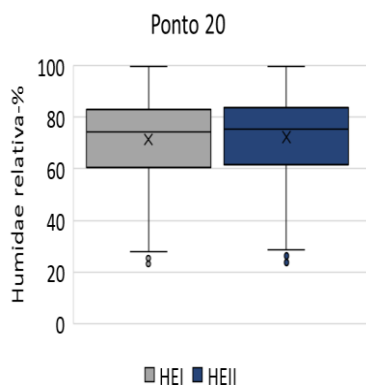
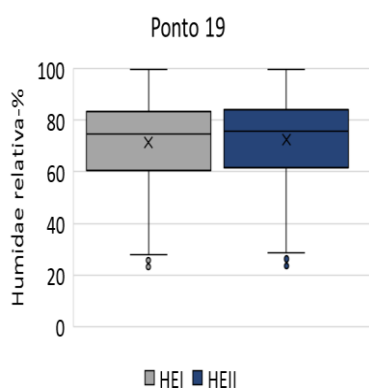
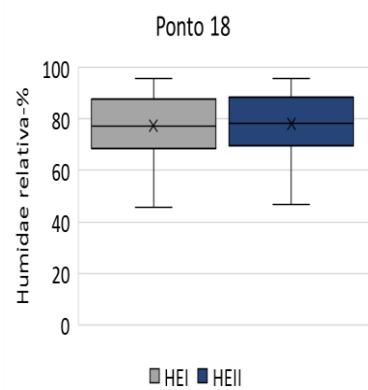
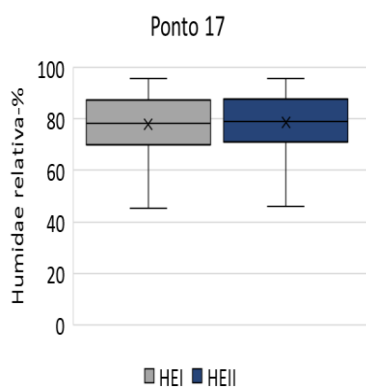
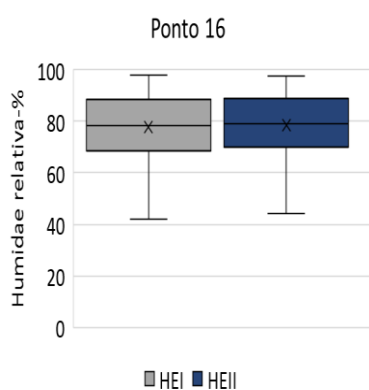
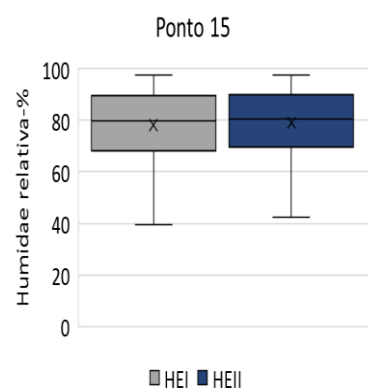
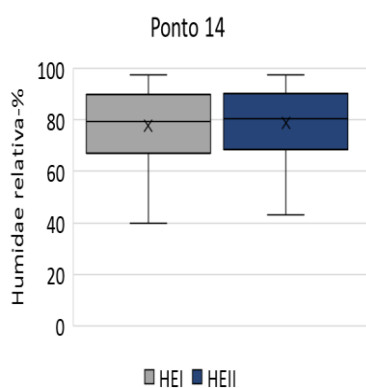
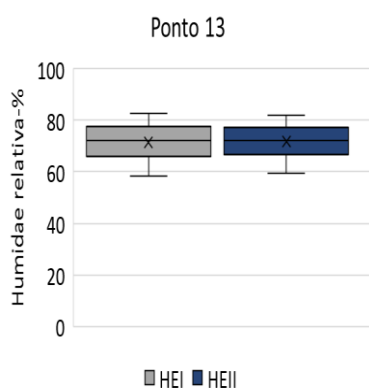


Condu tância térmica superficial: HEI, HEII

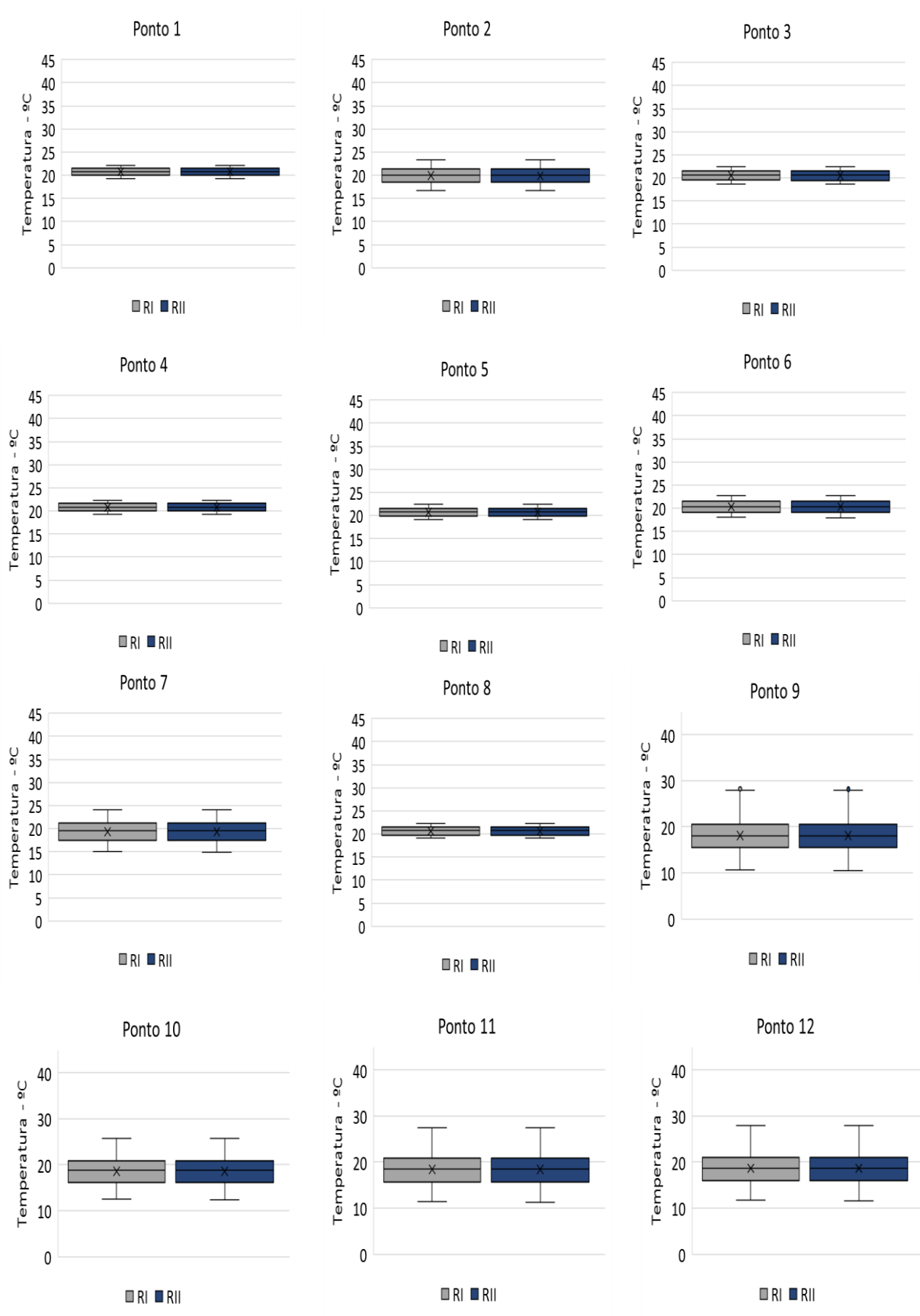


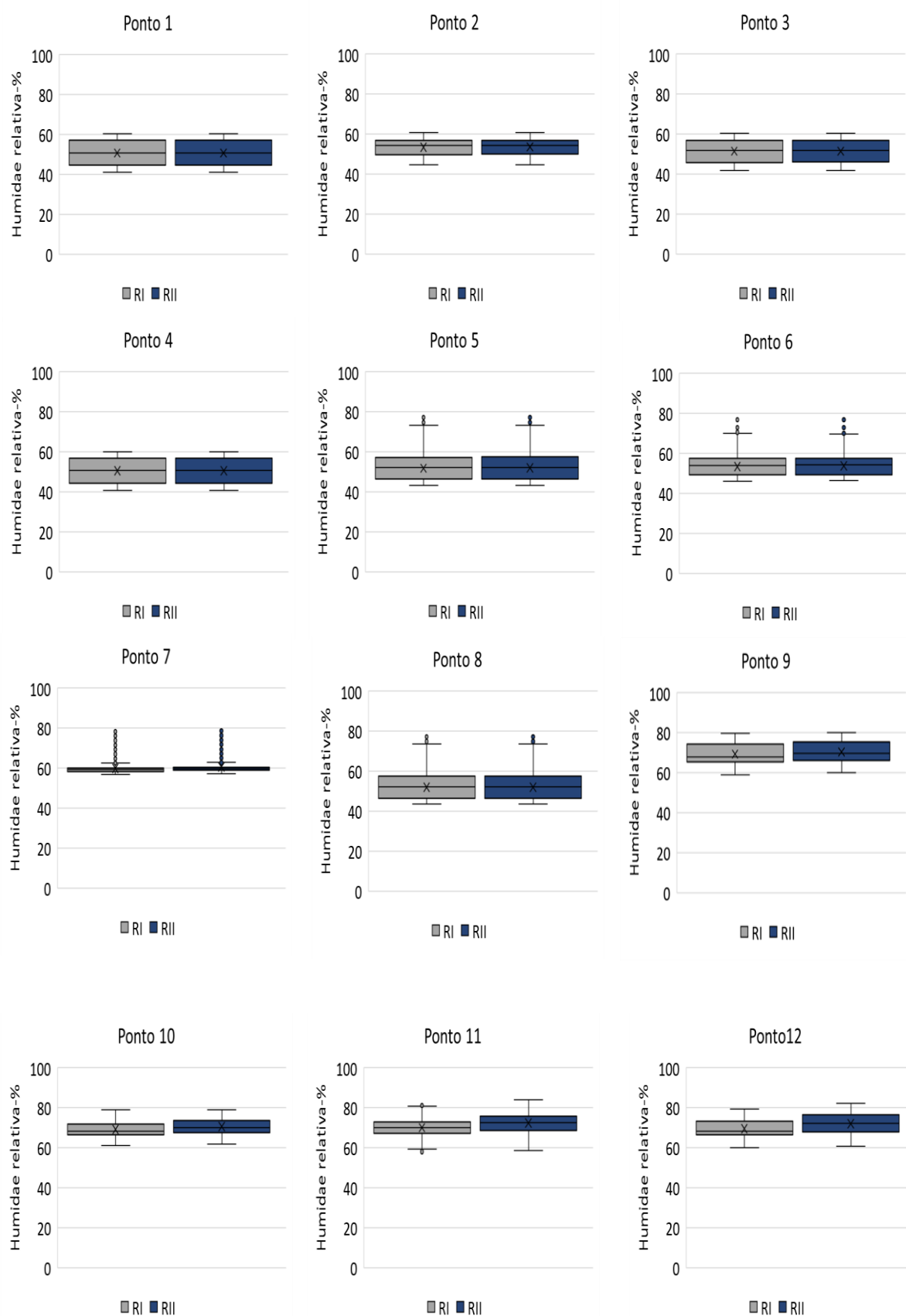


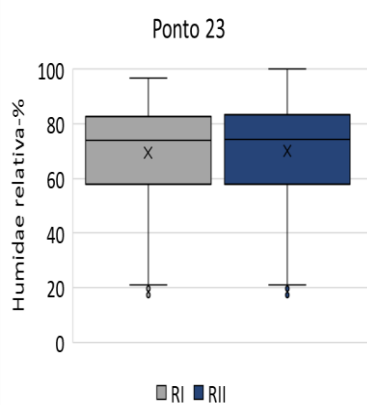
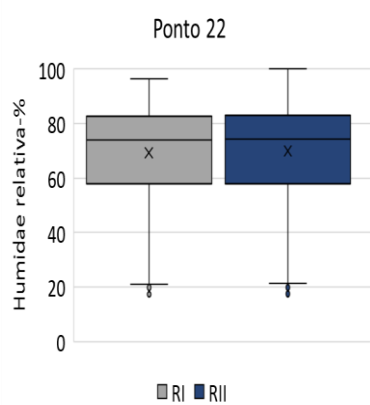
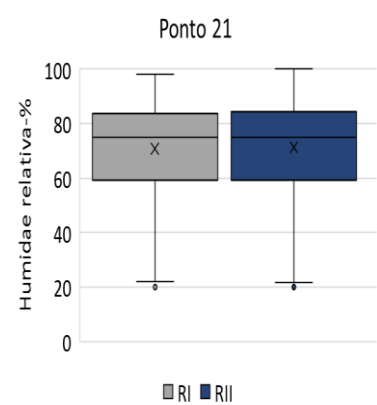
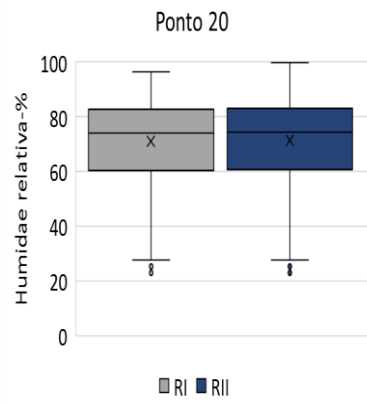
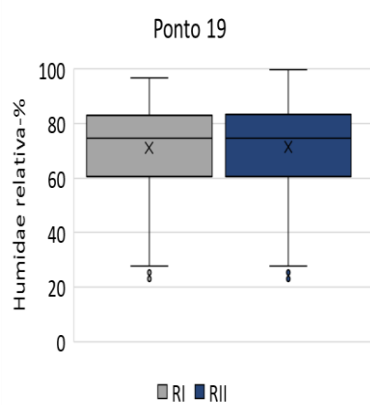
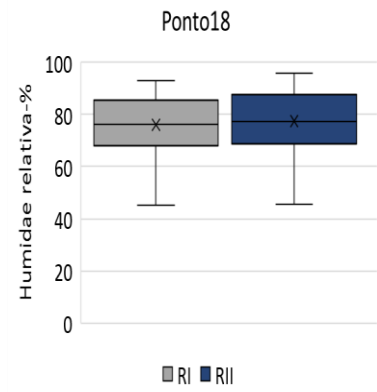
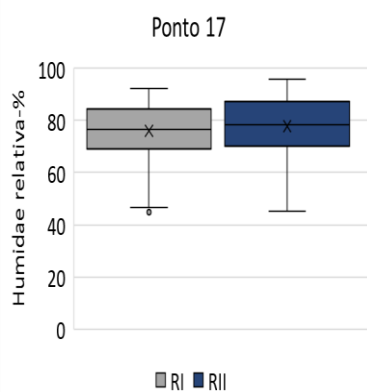
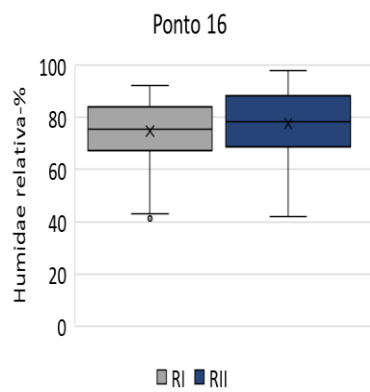
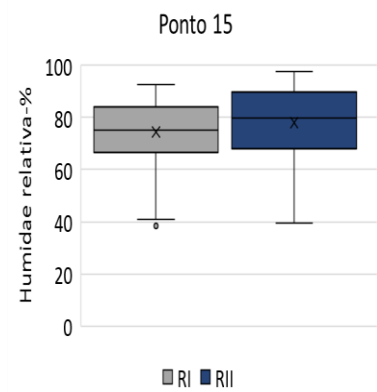
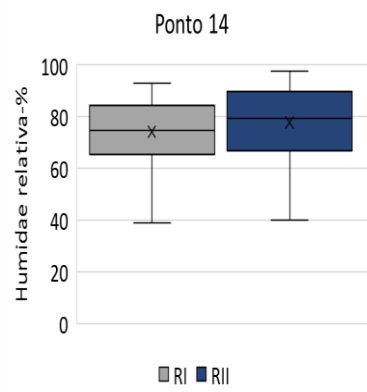
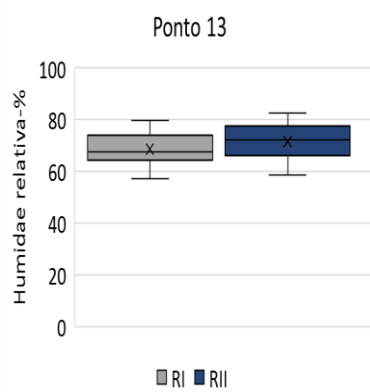




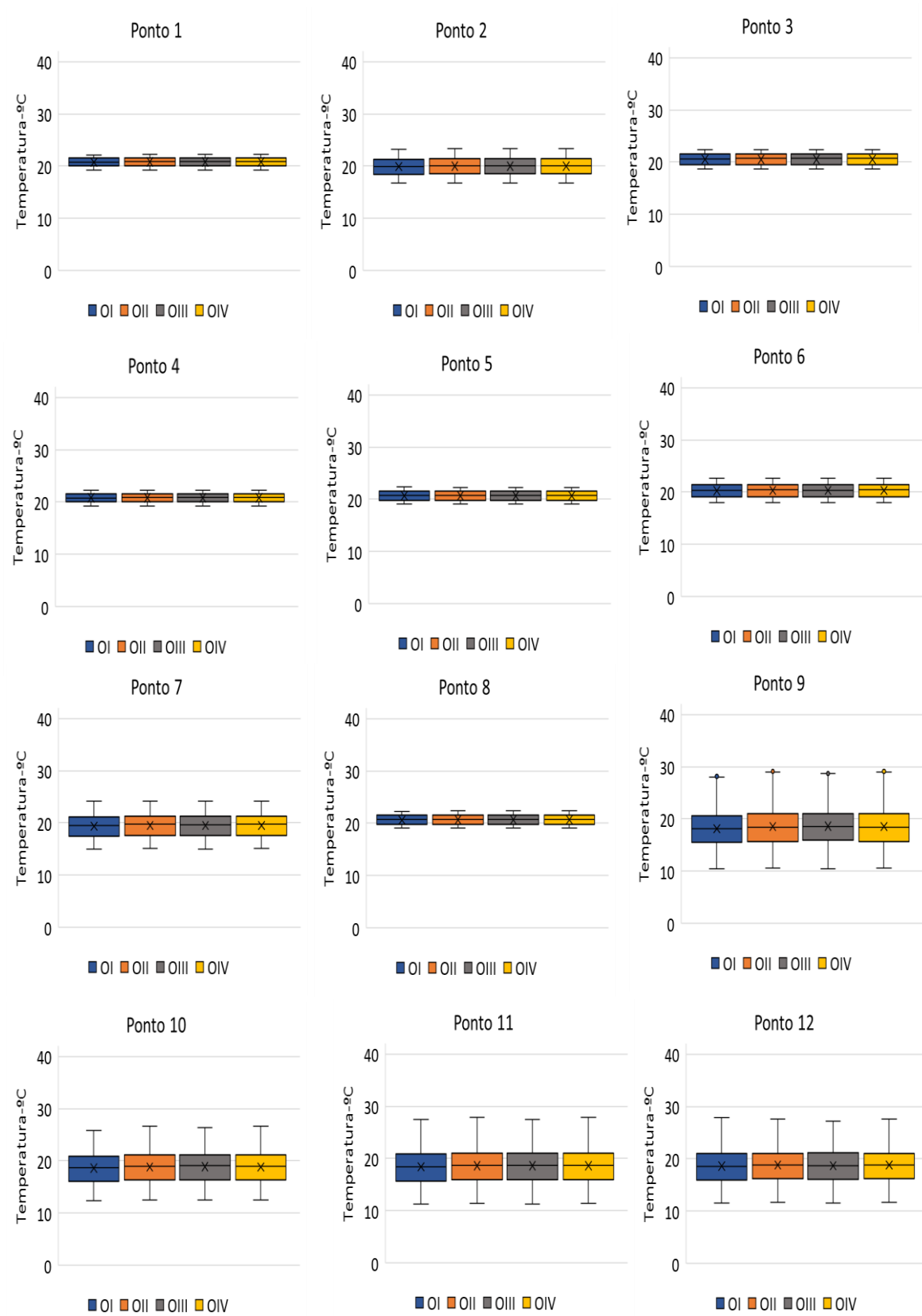
Fração de chuva incidente: RI, RII

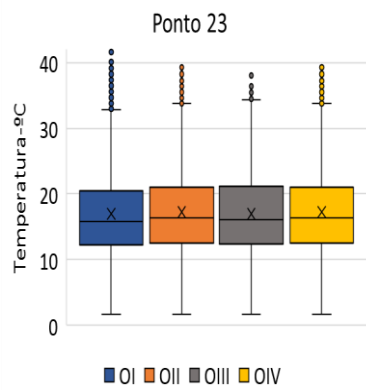
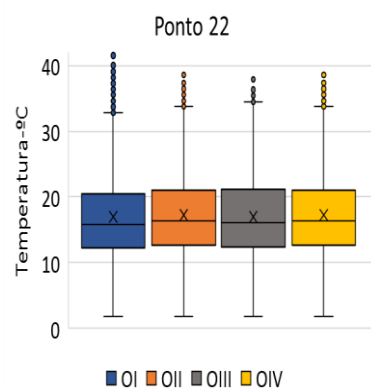
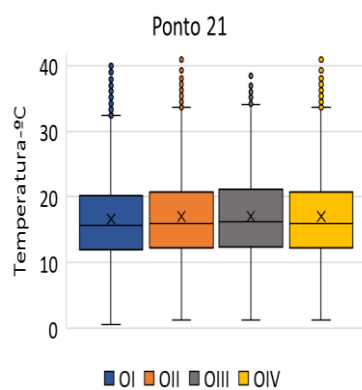
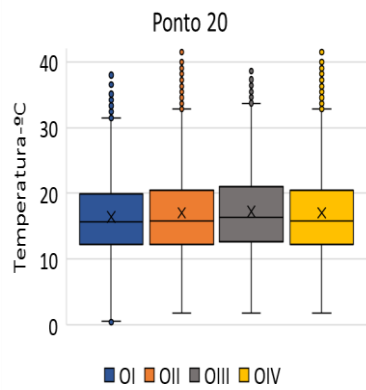
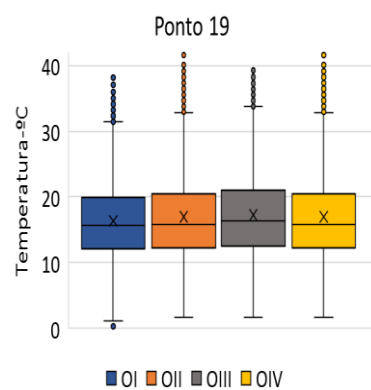
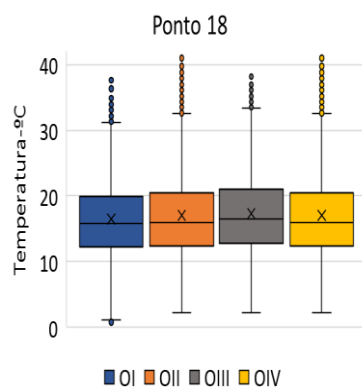
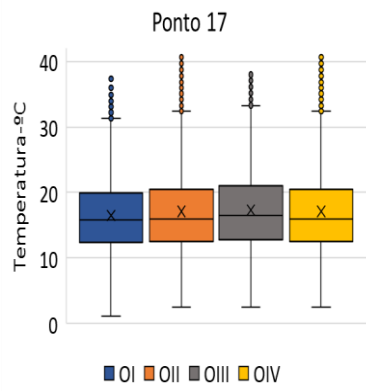
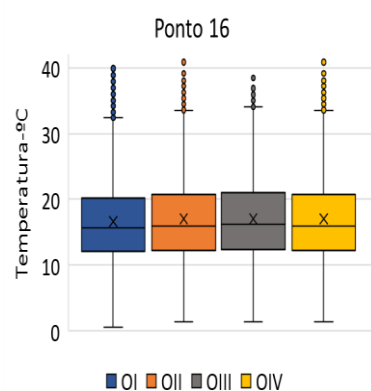
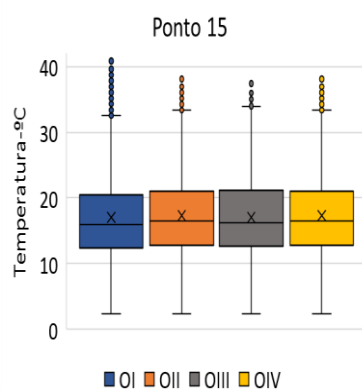
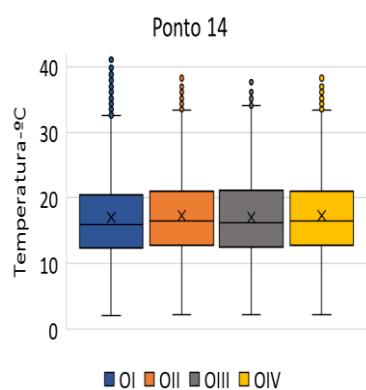
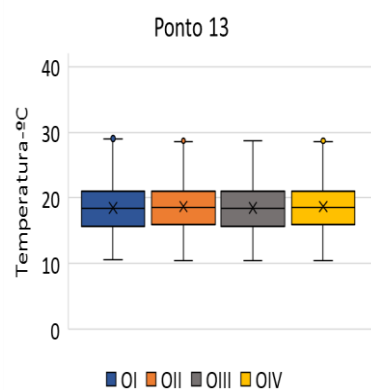


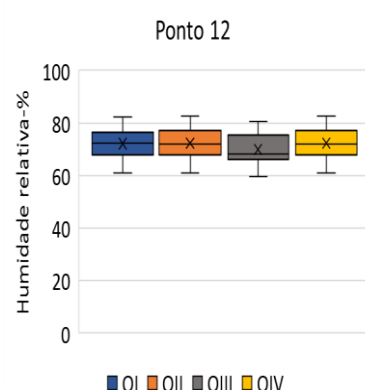
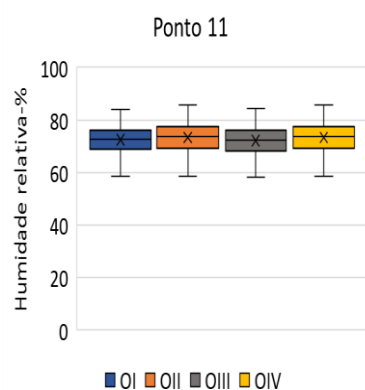
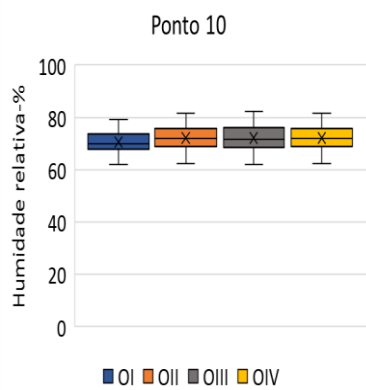
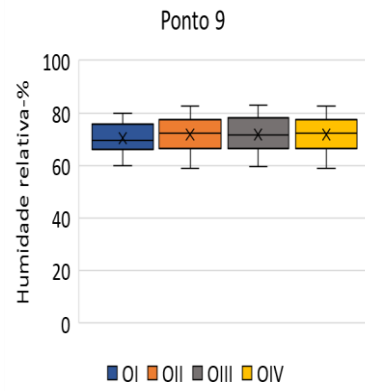
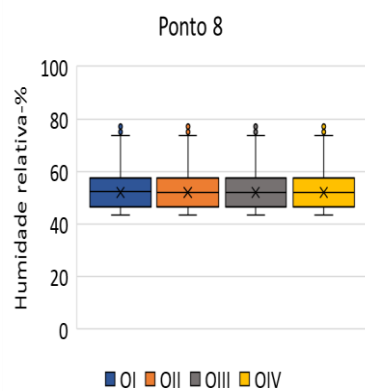
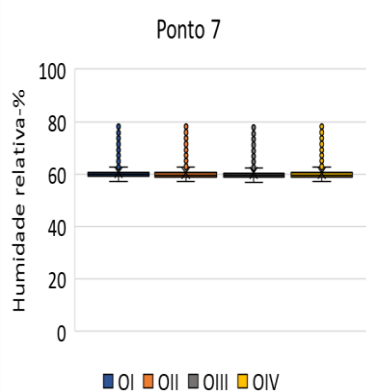
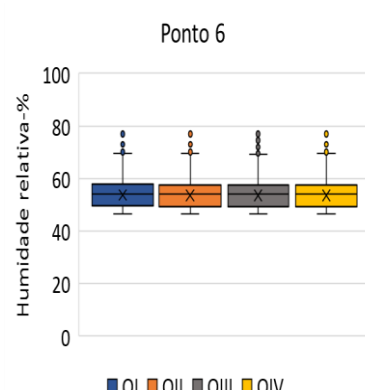
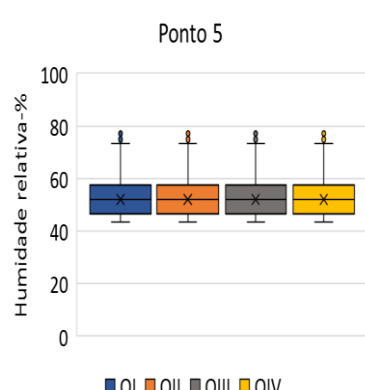
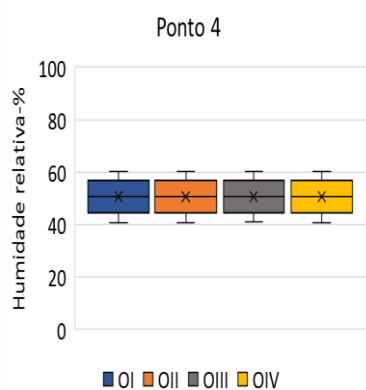
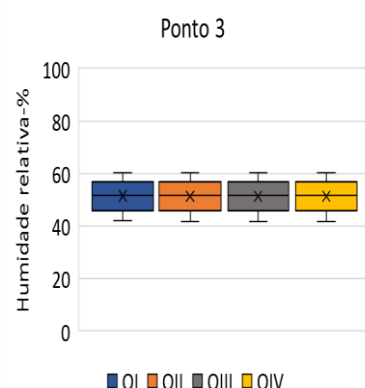
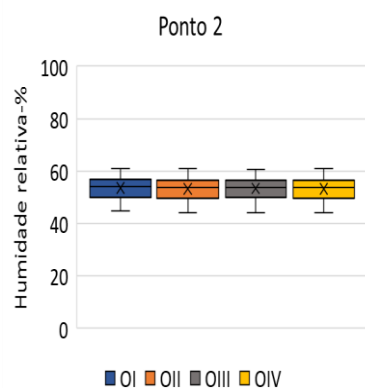
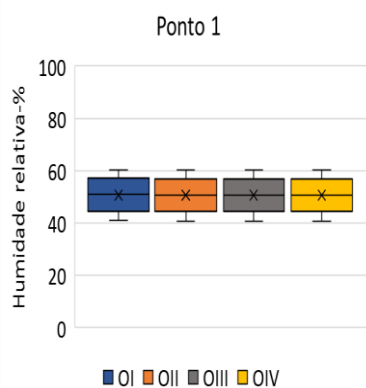


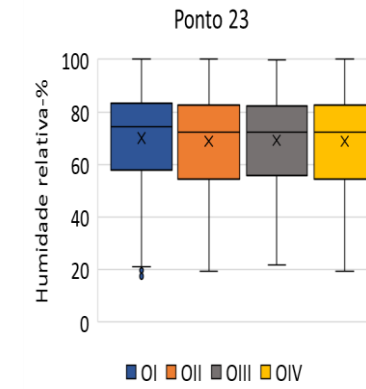
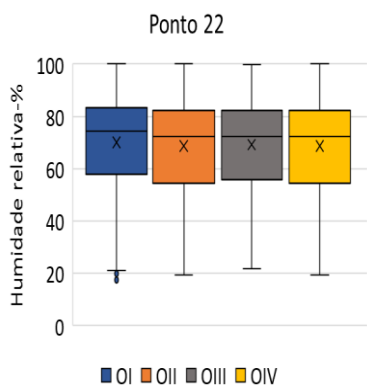
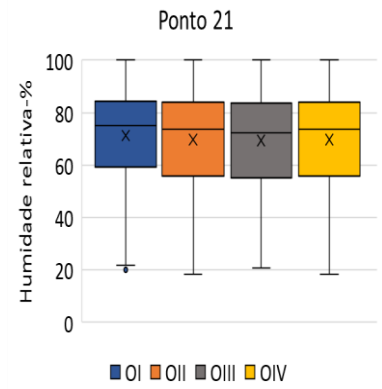
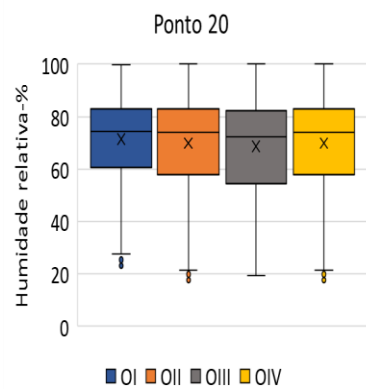
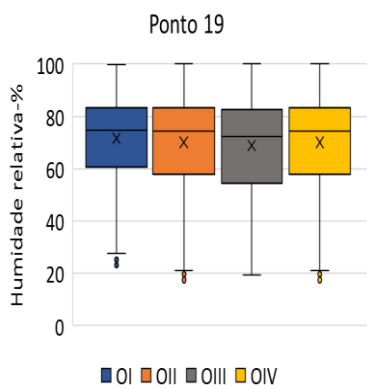
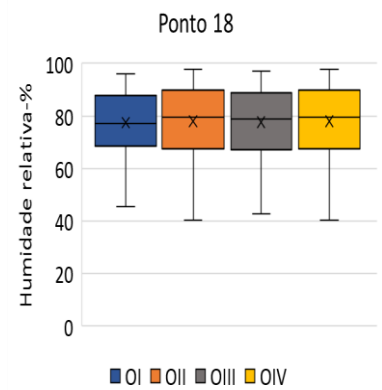
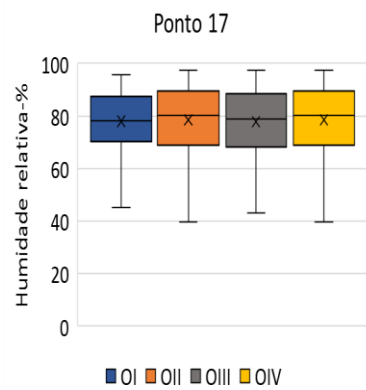
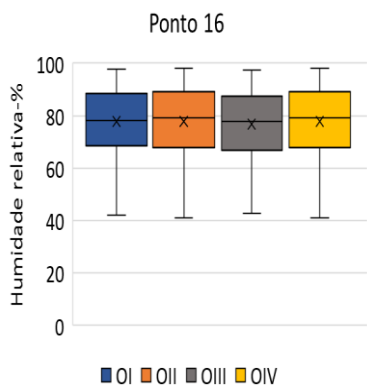
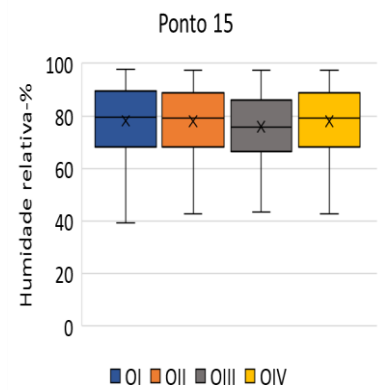
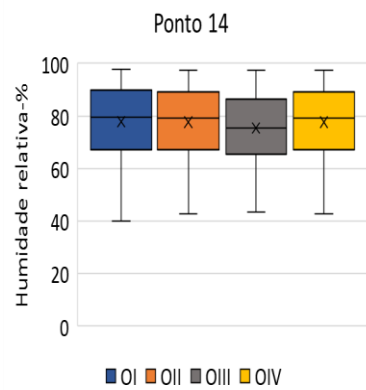
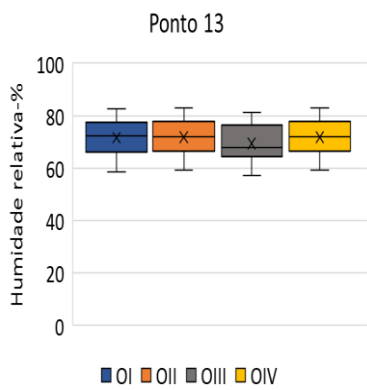


Orientação do elemento: OI, OII, OIII, OIV

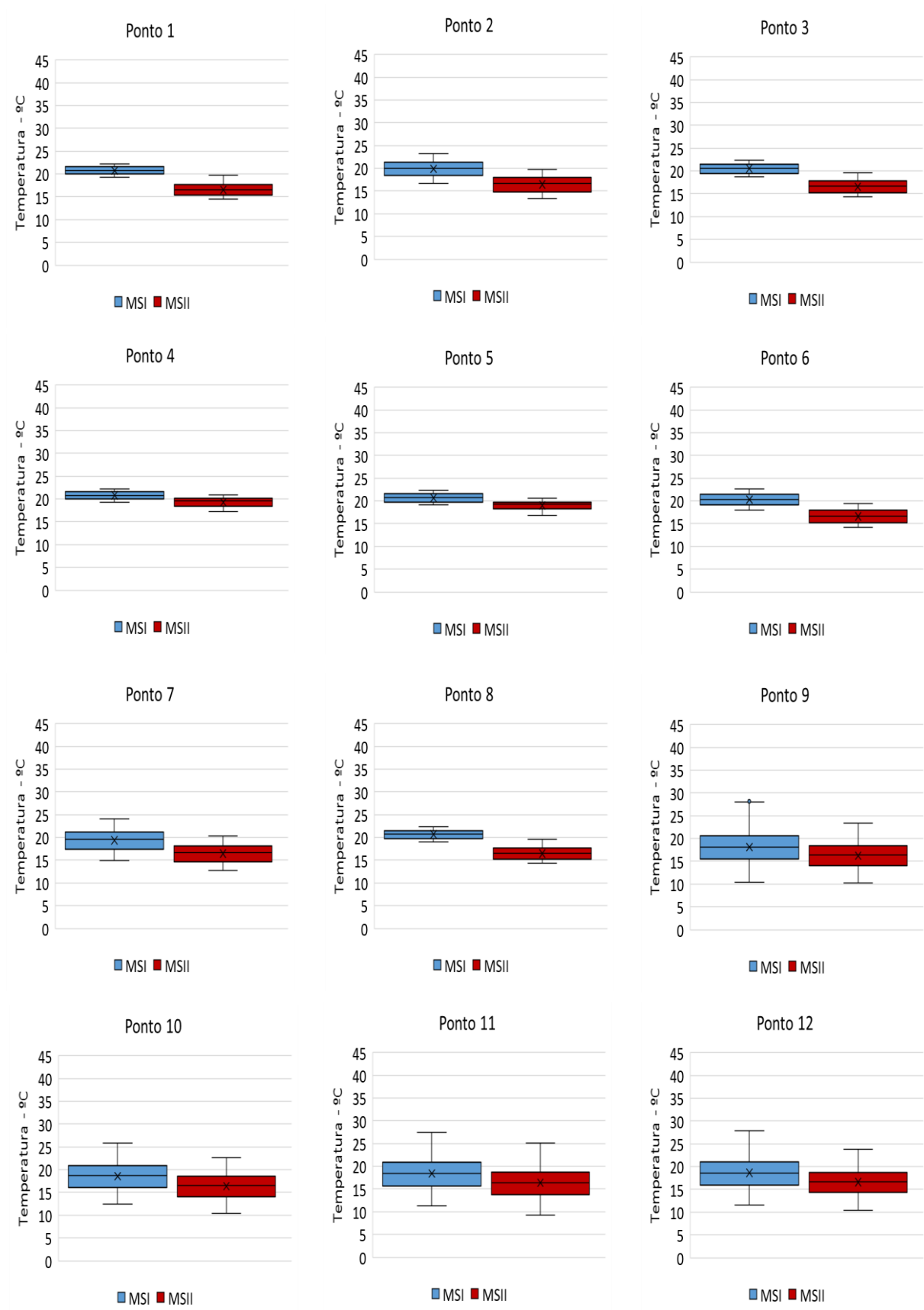


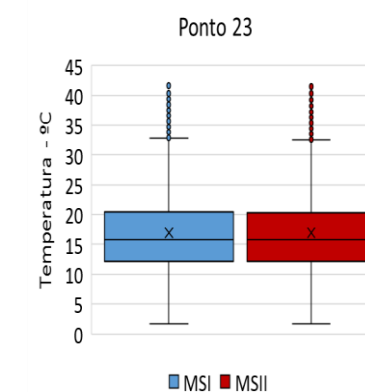
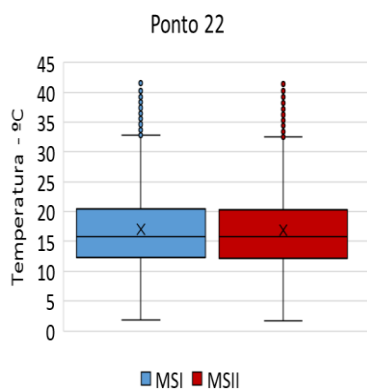
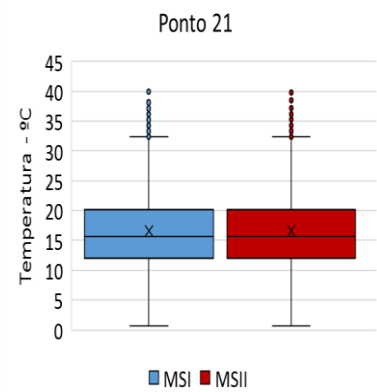
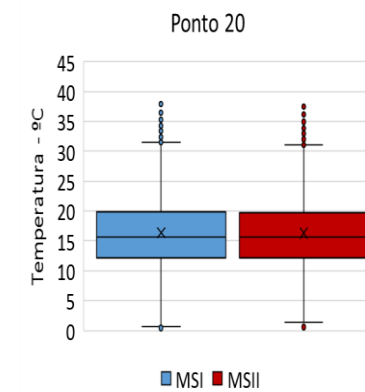
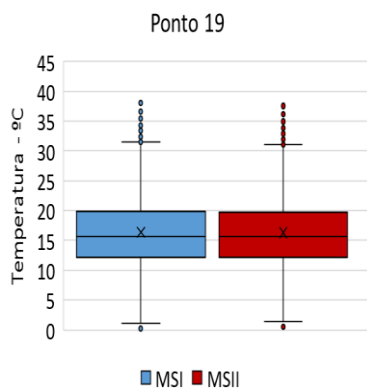
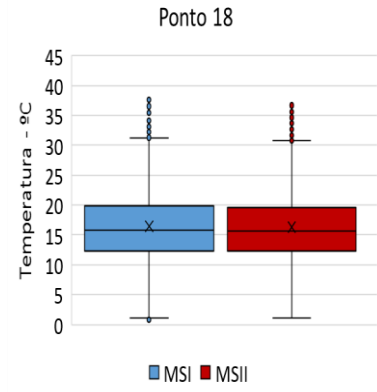
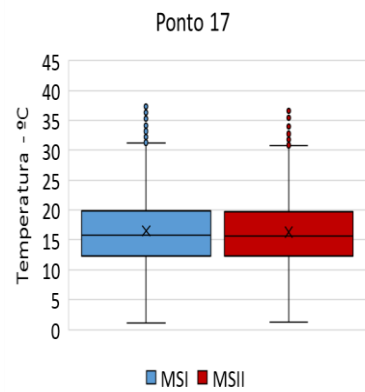
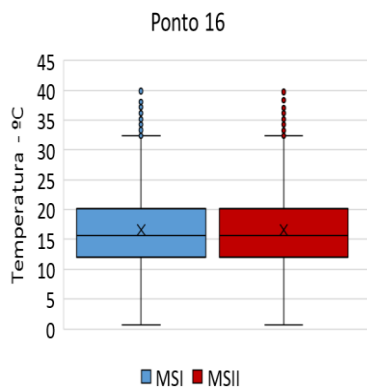
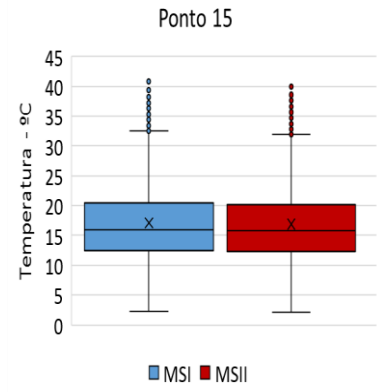
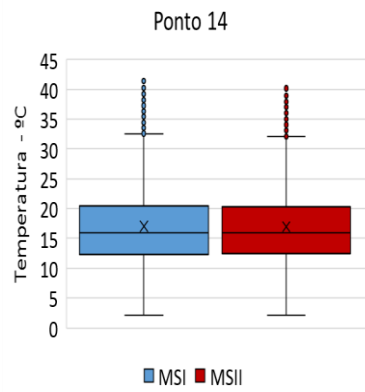
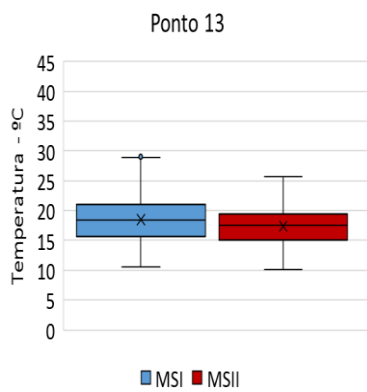


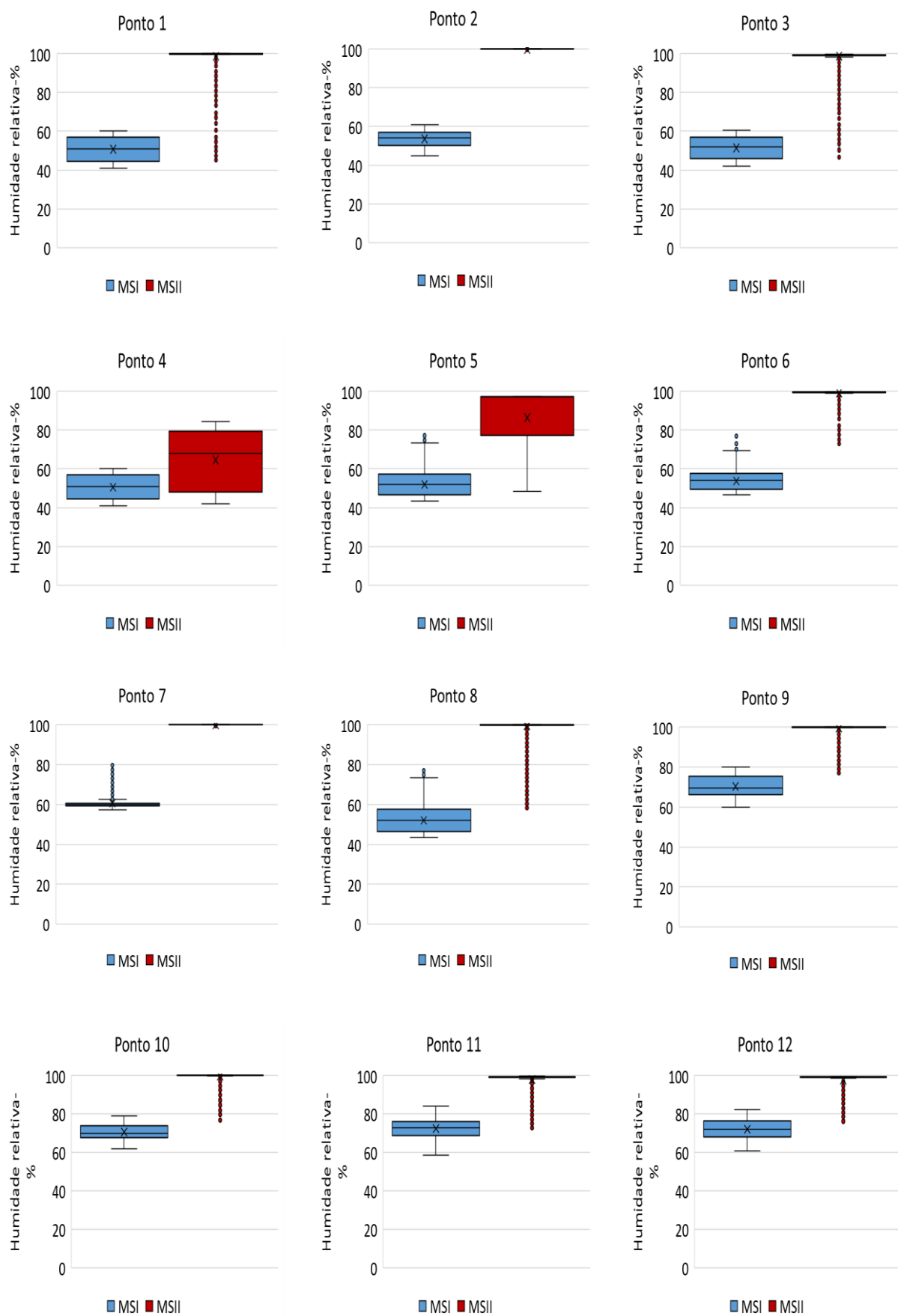


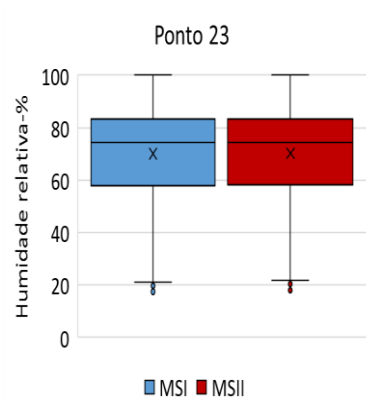
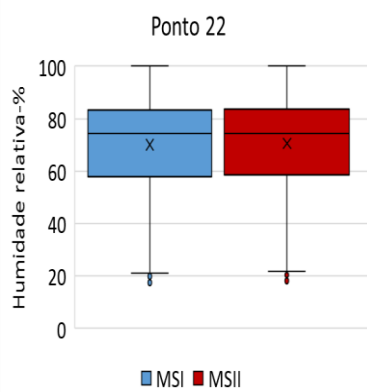
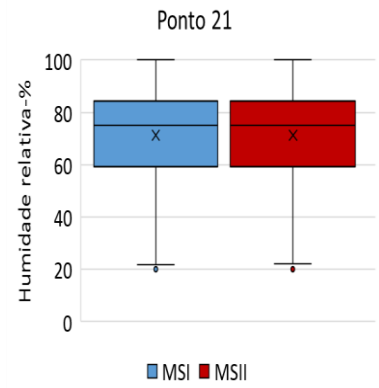
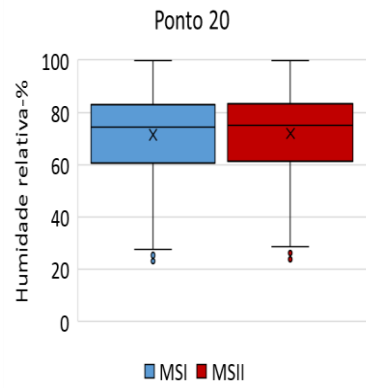
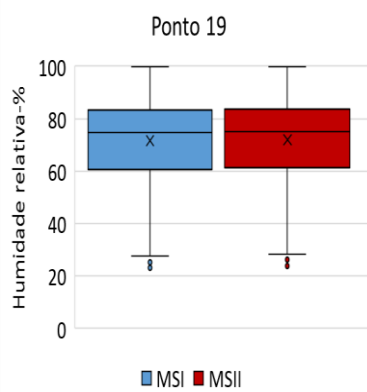
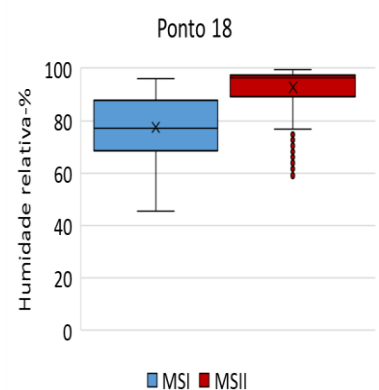
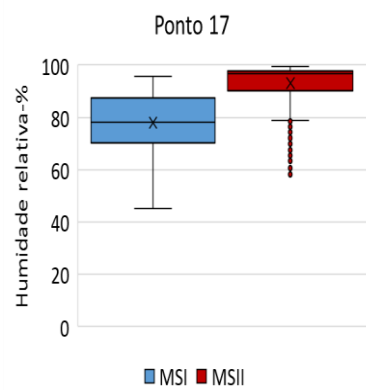
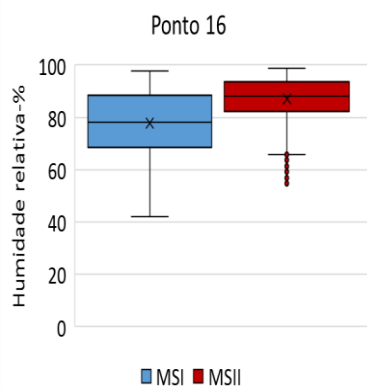
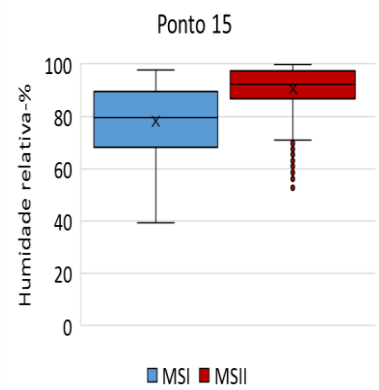
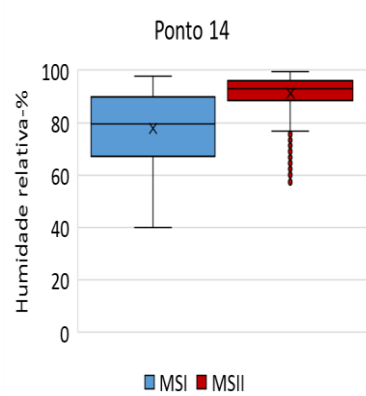
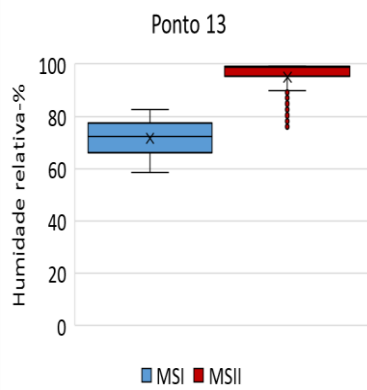


Fonte de humidade: MSI, MSII

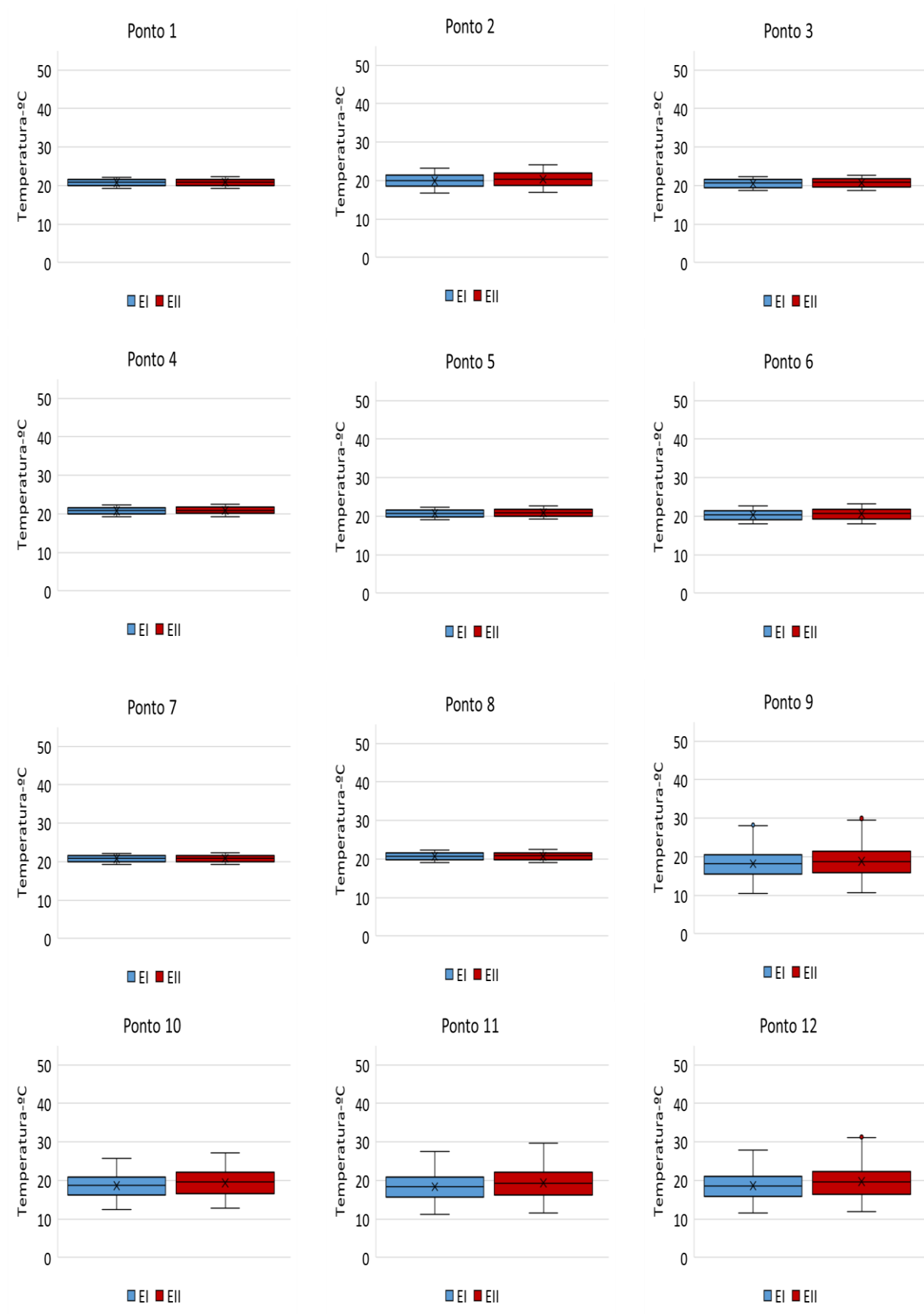


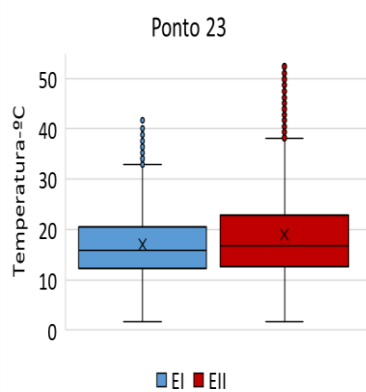
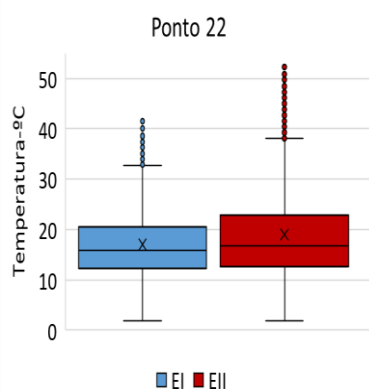
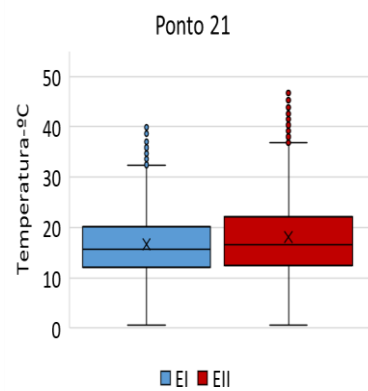
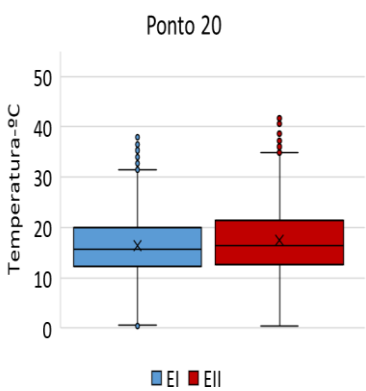
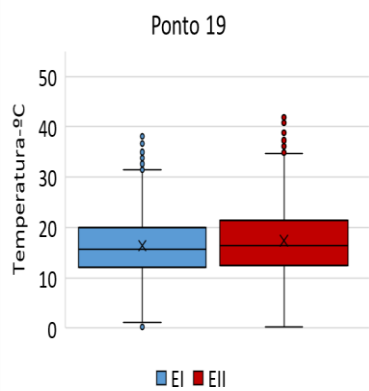
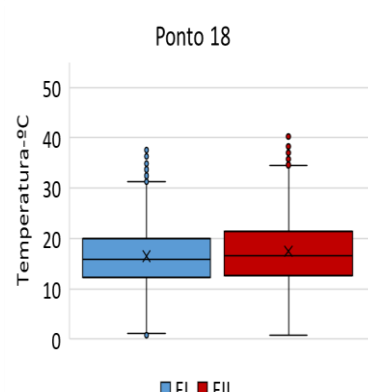
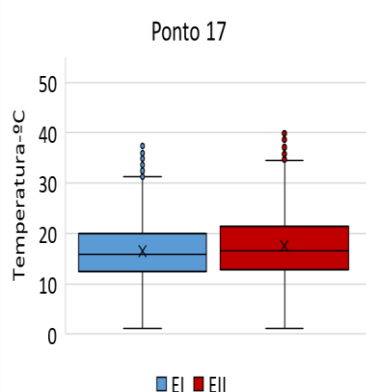
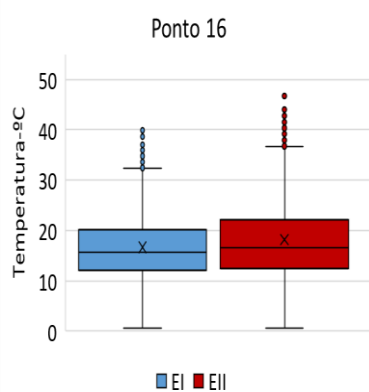
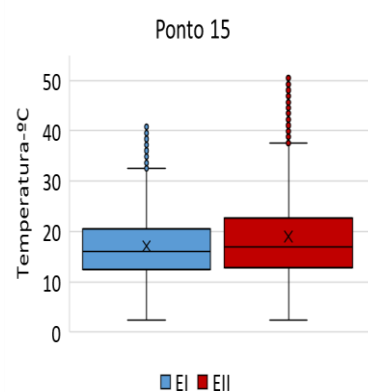
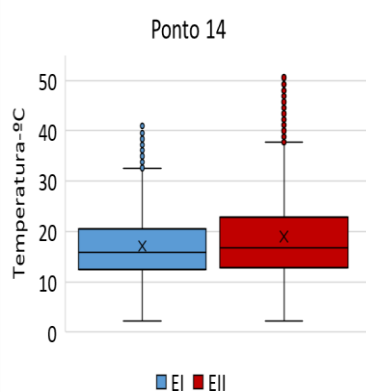
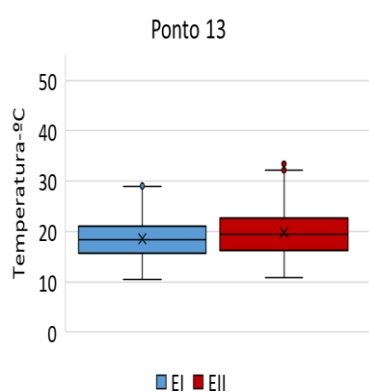


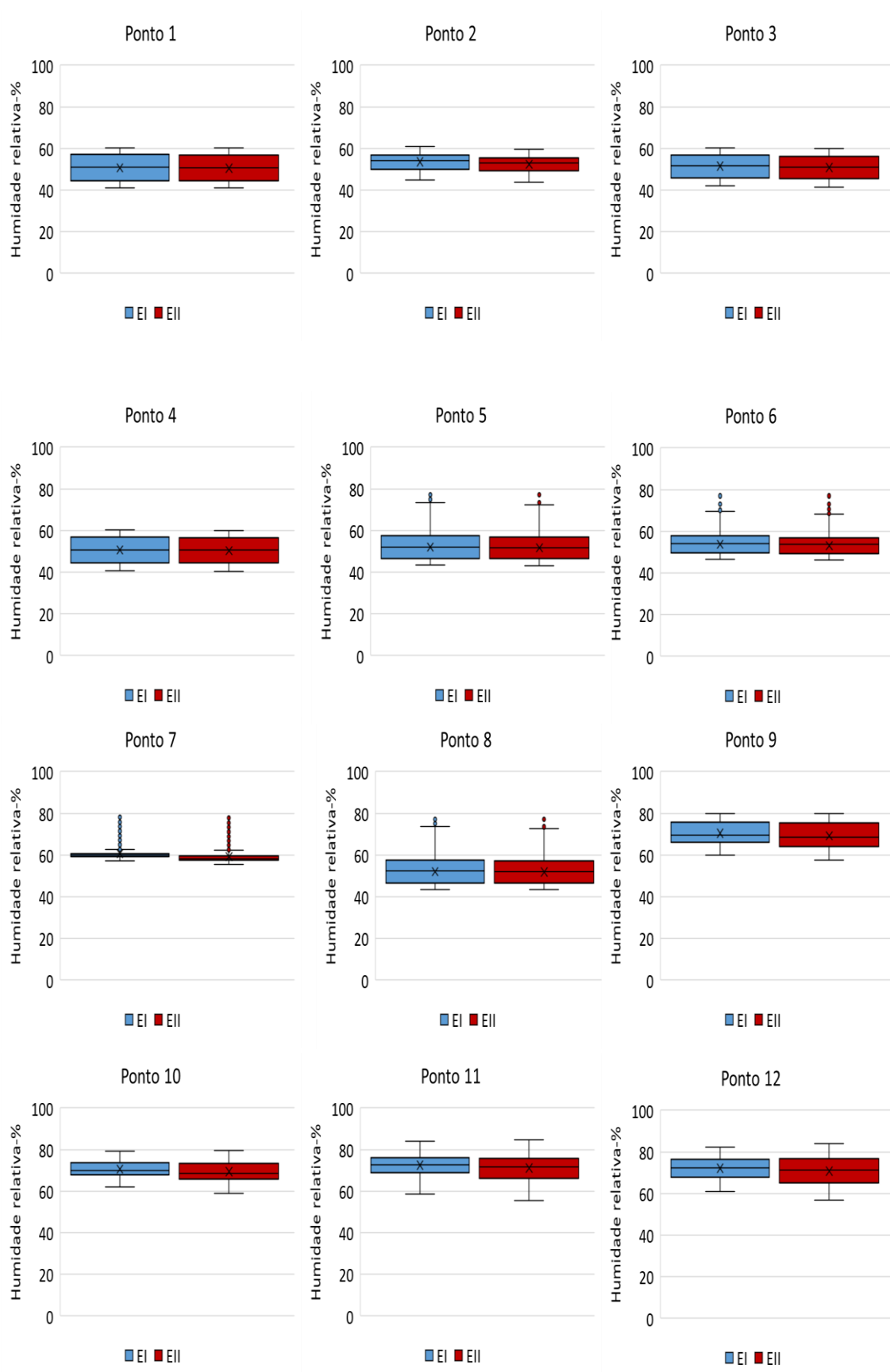


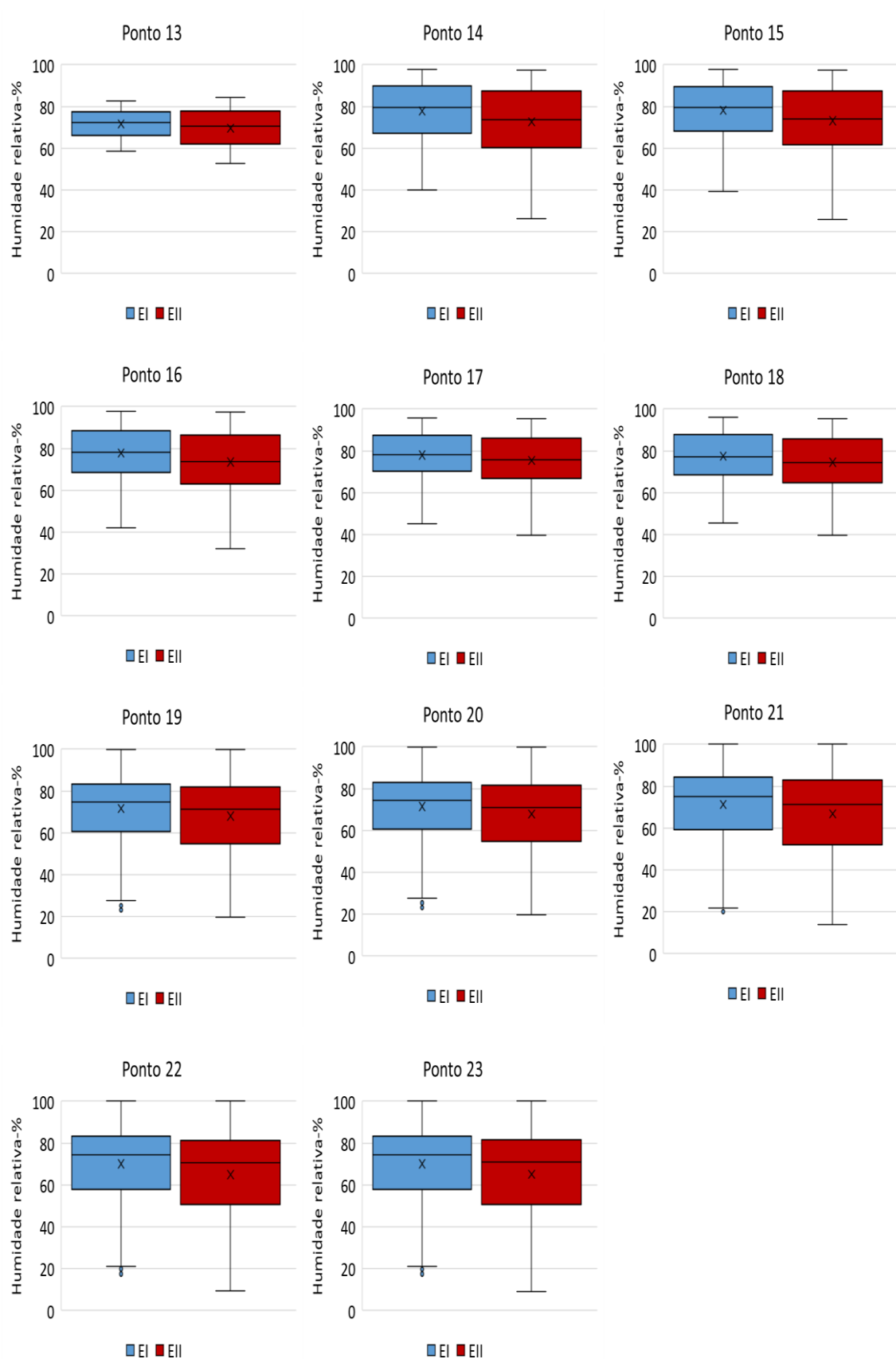


Emissividade: EI, EII



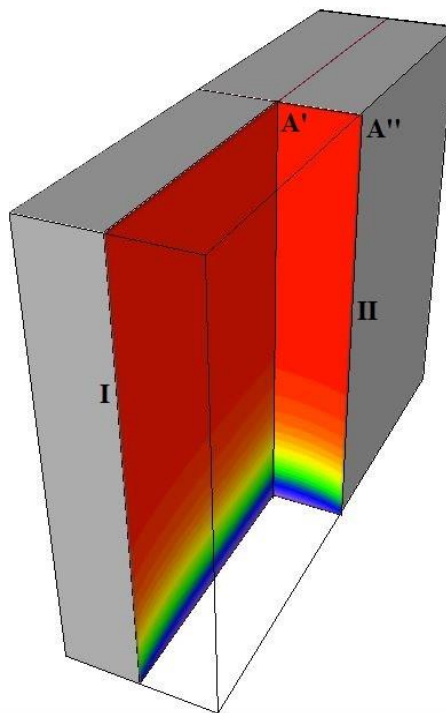






Anexo II

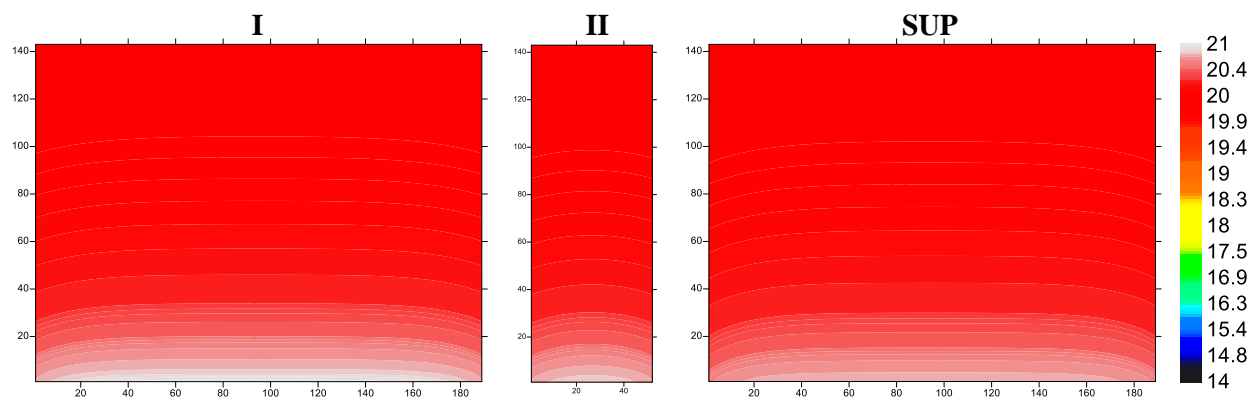
Peris de temperatura em S1, S2, S3 e S4



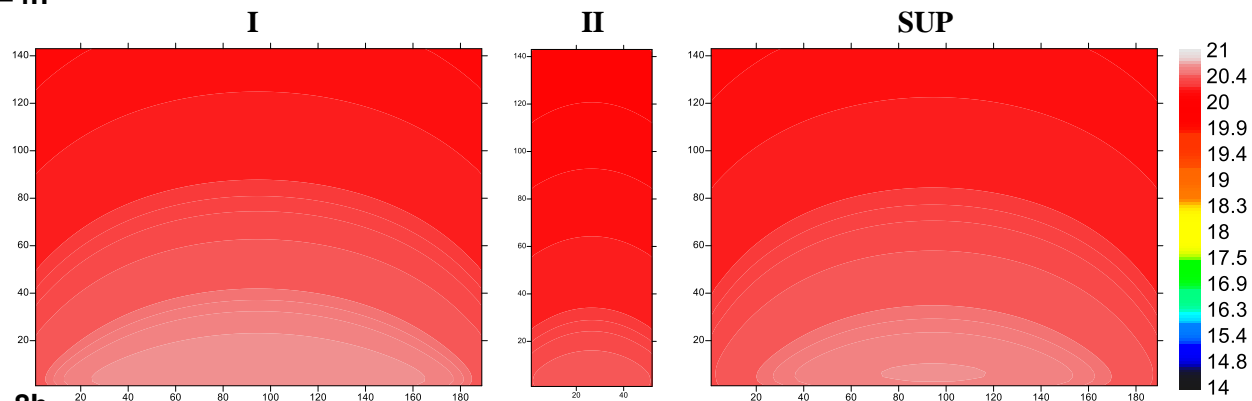
Partindo do princípio que o comportamento transversal do calor é o mesmo para o provete inteiro, definido pelo perfil de temperatura II, é possível gerar o perfil de temperatura à superfície do provete, atribuindo o comportamento de temperatura no perfil II às temperaturas no perfil I. As linhas verticais A' e A'' pertencem ao perfil de temperatura II e correspondem, respetivamente, às linhas de temperatura no centro e na extremidade do perfil, sendo que a variação de temperatura entre o perfil I e a superfície exterior do provete é dada pela subtração de A' a A''. Desta subtração, resulta uma linha de diferenças de temperatura, que somada a todas as linhas que compõem o perfil I, origina num novo perfil de temperatura- perfil de temperatura superficial (SUP).

S1

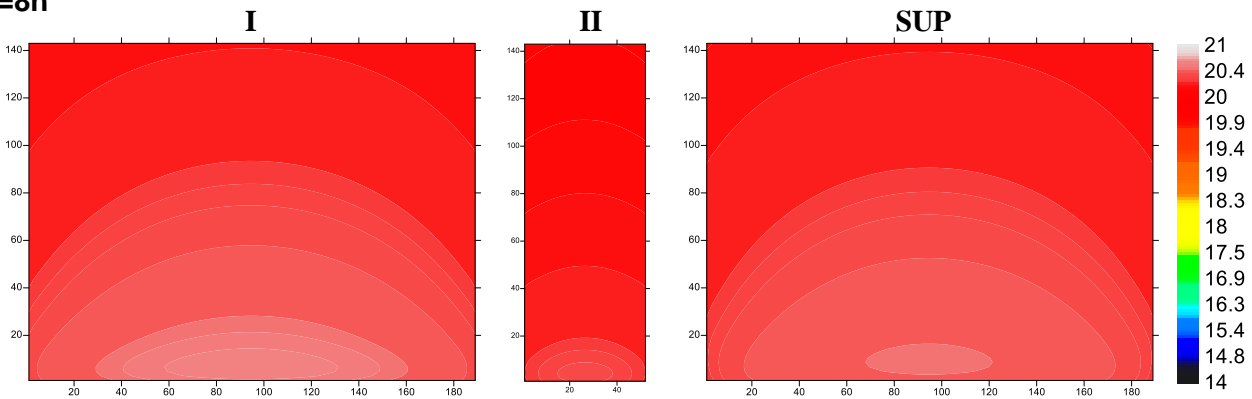
t=0.5h



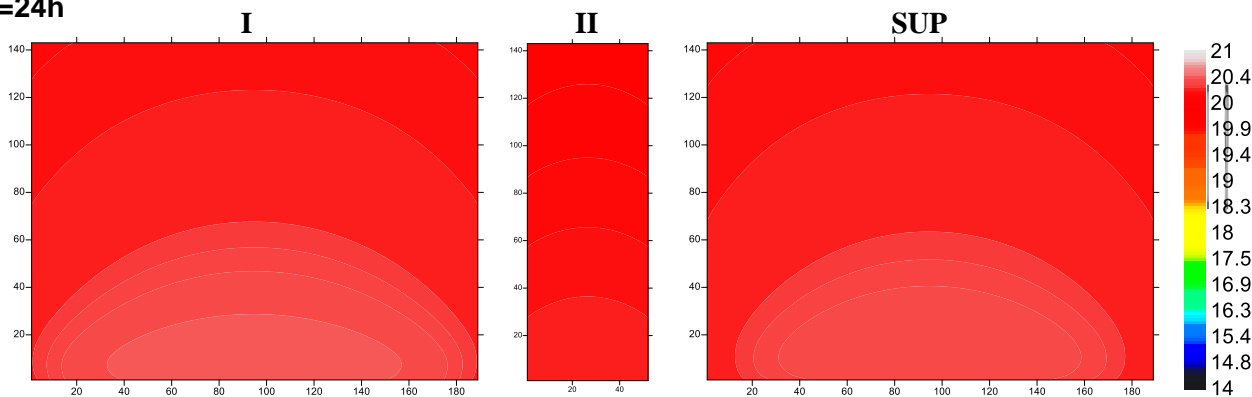
t=4h



t=8h

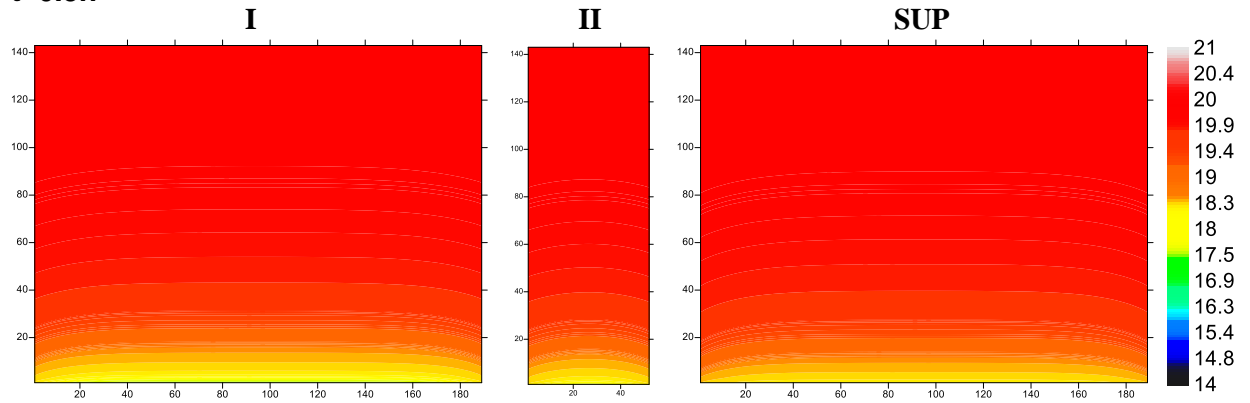


t=24h

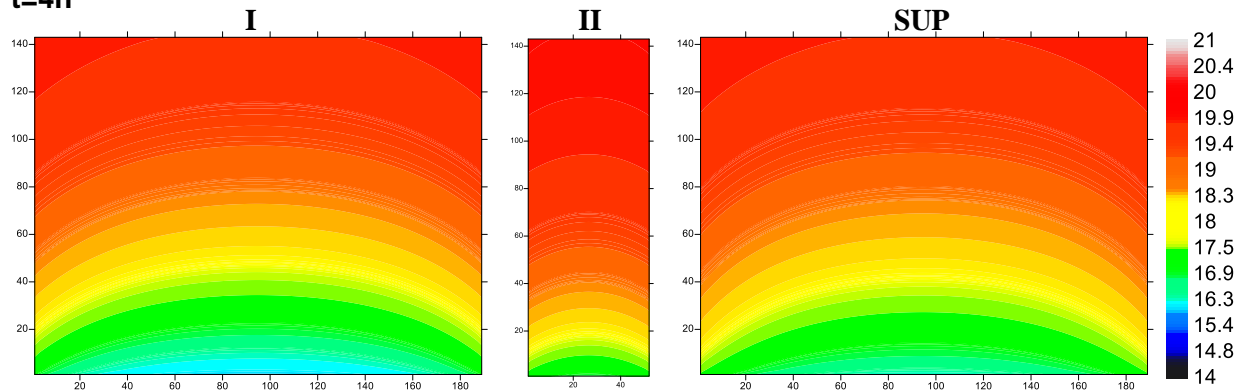


S2

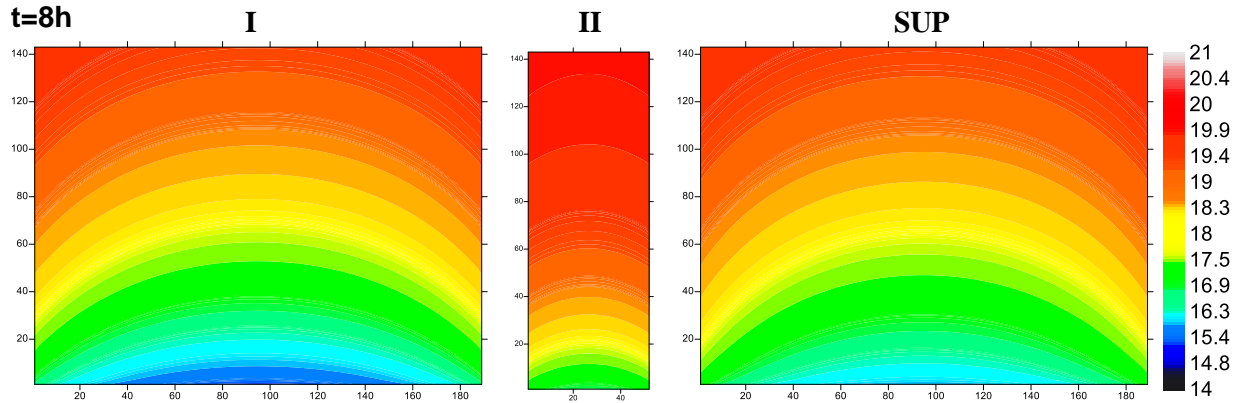
t=0.5h



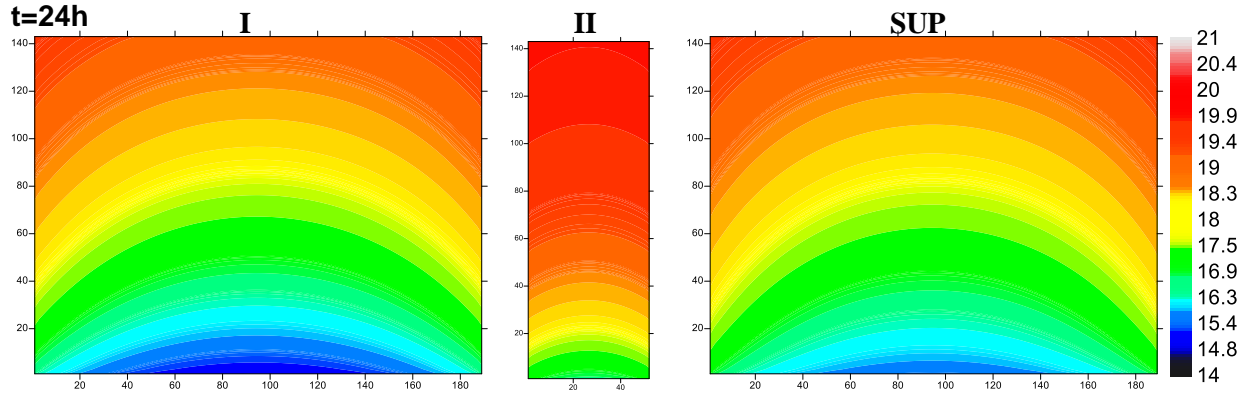
t=4h



t=8h

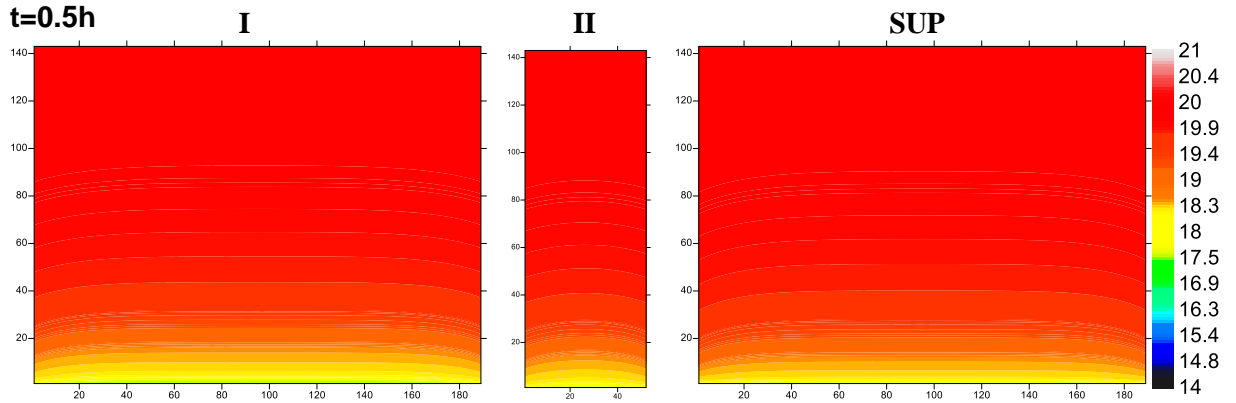


t=24h

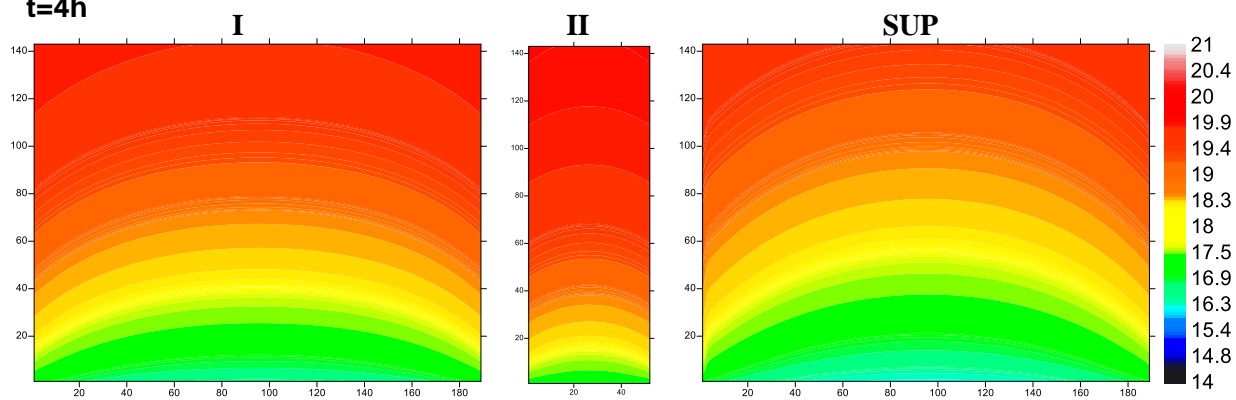


S3

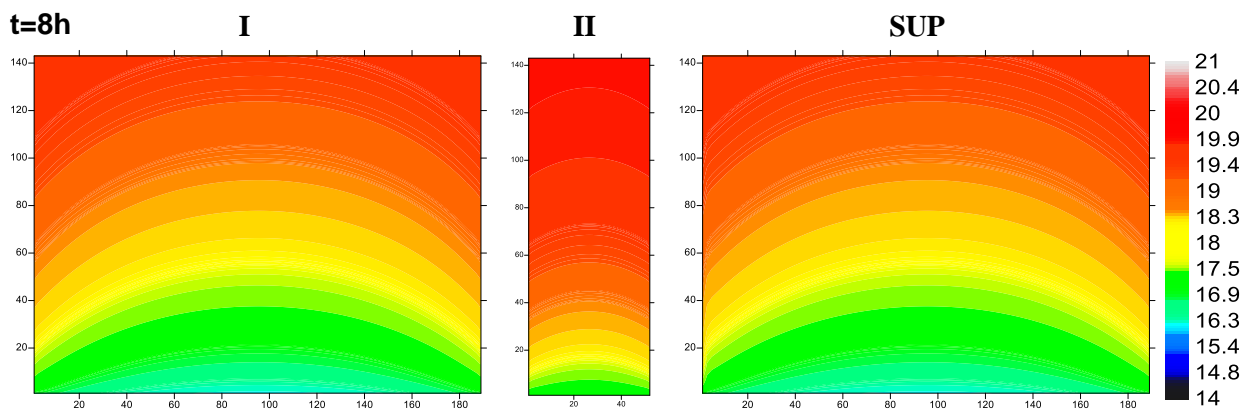
t=0.5h



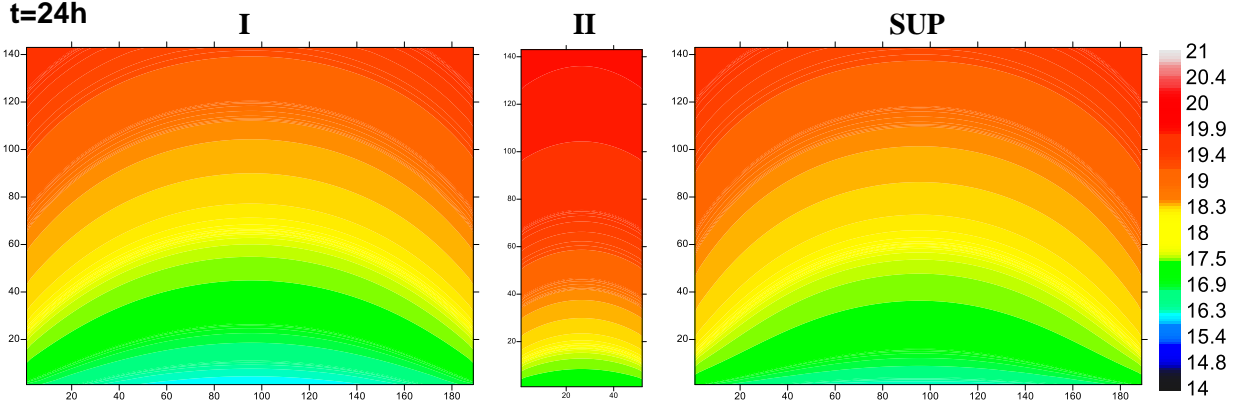
t=4h



t=8h

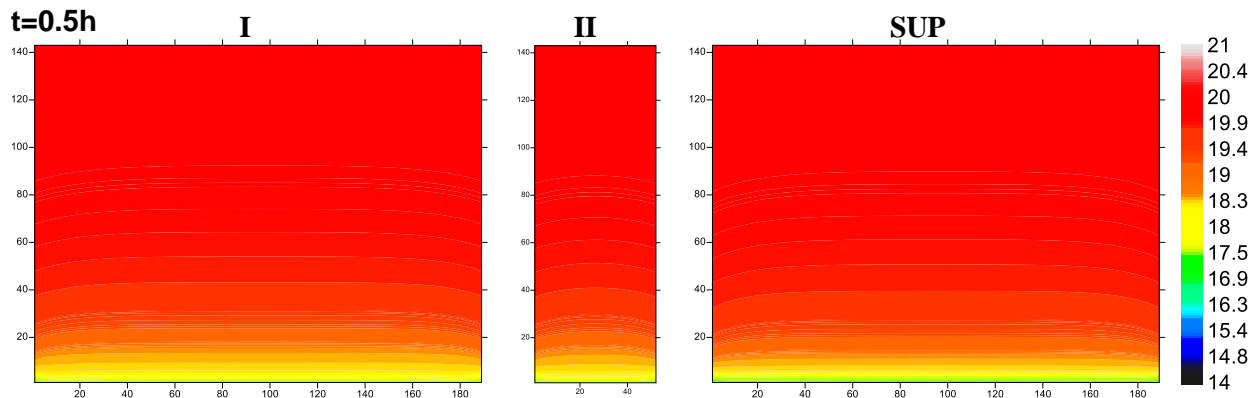


t=24h

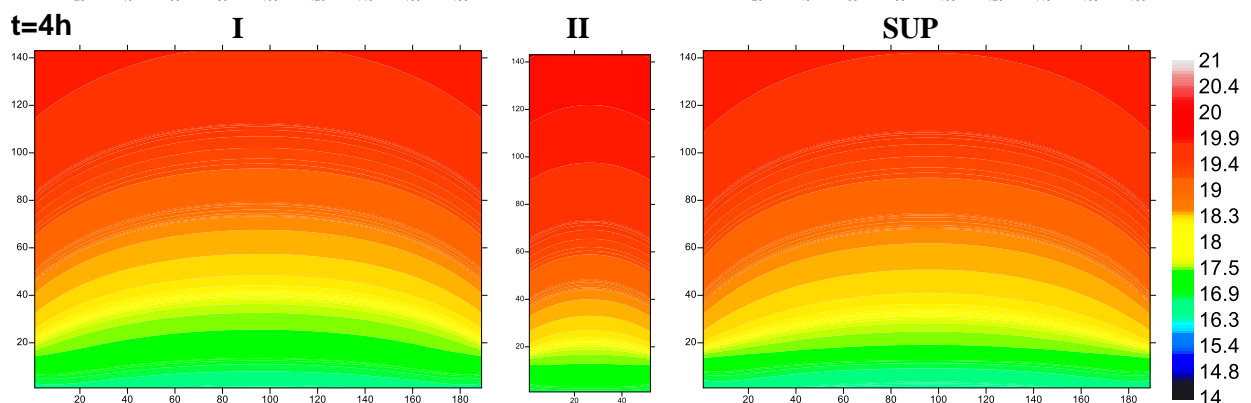


S4

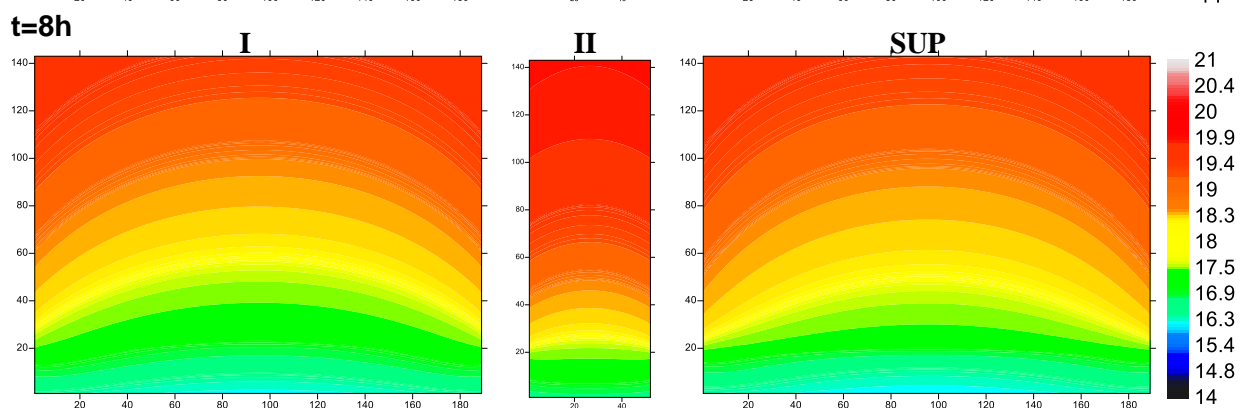
t=0.5h



t=4h



t=8h



t=24h

